EXTINCION DE LAS ESPECIES • LENTES GRAVITATORIAS

INVESTIGACION y CIENCIA

ENERO 2002
4,81 EURO 800 PTA.

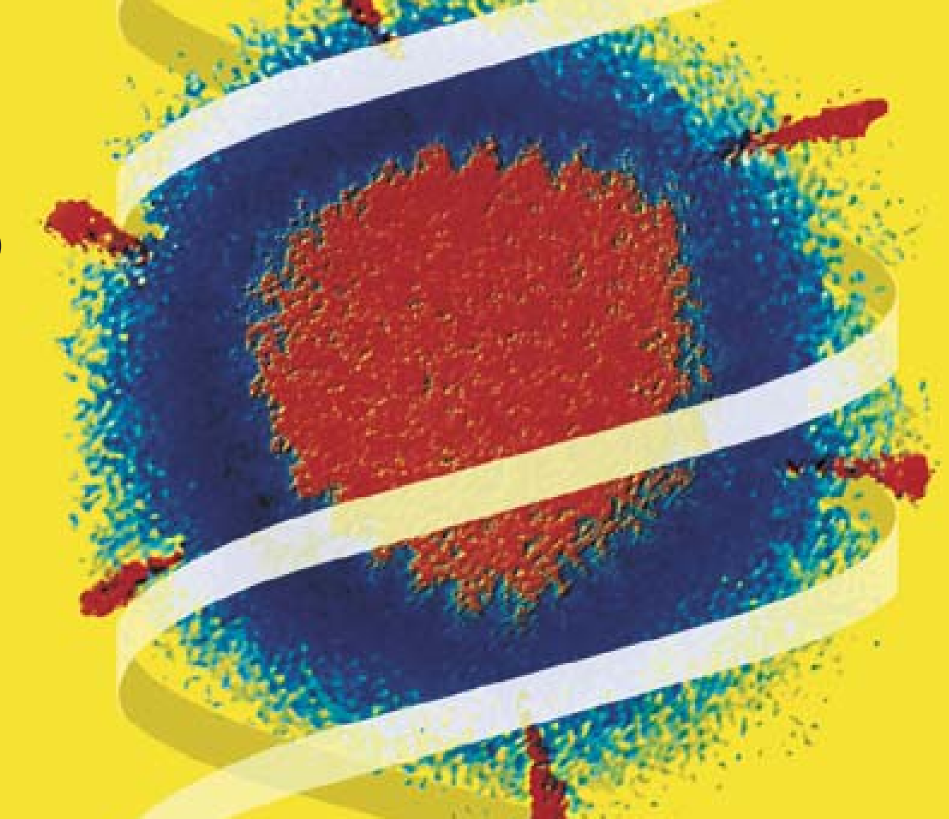
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LUCHA GENETICA CONTRA LOS VIRUS

Sedimentos vítreos de la Pampa

Evolución del parto

El papel electrónico







Enero de 2002 Número 304

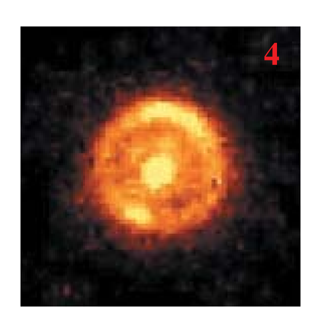
SECCIONES







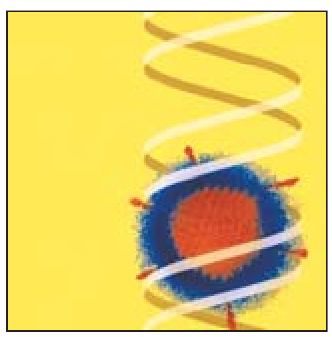






Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Biozentrum/SPL/Photo Researchers, Inc., y Jana Brenning

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	NASA/ESA
6	Joachim Wambsganss (*arriba*); Atelier Kühn/SdW (*abajo*)
7	Joachim Wambsganss
8	Lindsay King (*anillo*); Frederic Courbin (*cuásar doble*)
9	Joachim Wambsganss; Sara Chen (*gráfico*)
10	Joachim Wambsganss
11	NASA; W. N. Colley y E. Turner; J. A. Tyson, Bell Laboratories
12	Sara Chen (*arriba*); Frederic Courbin (*doble cuásar*)
13	NASA/ESA; Spektrum der Wissenschaft (*gráfica*)
17-19	Quade Paul
21	Cortesía de Laboratorios Abbott
24-27	Bruce Strachan
30	Jon Burbank
31	Bruce Strachan
42-51	Marcelo A. Zárate y Peter H. Schultz
55	Cheryl D. Knott
57	Lester V. Bergman, *Corbis* (*trilobite*); James L. Amos, *Corbis* (*Placodermo*); Richard Paselk, *Universidad Estatal Humboldt* (*coral y fitosauro*); Mike Everhart (*mosasauro*)
58	Sara Chen
60-61	Frans Lanting, *Minden Pictures*
64-65	Nina Finkel
66	Nina Finkel (*arriba*); Danny Lehman, Corbis (*fotografía*)
68-69	Sam Ogden
70	Eric Millette
71	Sam Ogden
72	Laurie Grace
73	Sam Ogden
75	Copyright 2000, American Geophysical Union
76	Agustín Udías
77	Copyright 2001, American Geophysical Union
78	Agustín Udías
79	Cortesía de E. Buforn
82	Wolfgang Bürger/SdW
83	Thorsten Krome (*arriba*); Wolfgang Bürger (*dibujo*)
84	Wolfgang Bürger
85	Ian Worpole
88-89	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Emilio Elizalde: *Lentes gravitatorias y materia oscura*; Esteban Santiago: *Fármacos contra virus*; Luis Bou: *La importancia del número de alumnos* y *Aventuras problemáticas*; Joandomènec Ros: *La extinción de las especies*; Carlos Lorenzo: *La evolución del parto humano*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	52,89 euro 8.800 pta.	96,16 euro 16.000 pta.
Extranjero	69,12 euro 11.500 pta.	129,22 euro 21.500 pta.

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 4,81 euro 800 pta.
Extraordinario: 6,01 euro 1.000 pta.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

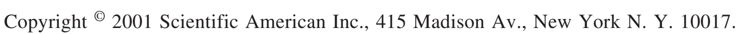
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

UN LECTOR DISCONFORME. «Señor director: El artículo de Louis N. Ridenour, de agosto de 1951, correctamente titulado ‘Una revolución en la electrónica’ es interesantísimo. Sin embargo, transmite la impresión completamente errónea de que el tubo amplificador de tres electrodos ha llegado al fin de su carrera. El doctor Ridenour omitió mencionar las limitaciones del transistor respecto a la frecuencia. Con tales limitaciones, no puede competir con el tubo de tres electrodos, o audión, como yo lo llamé en principio. La aplicación generalizada del transistor a la radio o televisión está muy lejos todavía.—Lee DeForest»

RIDENOUR CONTESTA. «Señor director: Me complace recibir los comentarios de quien posibilitó el estado presente de la electrónica, aunque deba estar un tanto en desacuerdo con alguno de ellos. Ciertamente, puede que falten algunos años para que los equipos comerciales de radio y televisión hagan uso del transistor. Pero ese retraso probablemente se deberá a la incapacidad de la producción de transistores para hacer frente a unas enormes y crecientes demandas militares. Las principales limitaciones de los aparatos electrónicos más complejos radican en las insuficiencias fundamentales del tubo de vacío, que casi medio siglo de desarrollo han aliviado pero no remediado.—Louis N. Ridenour»

¿AVES DE CORRAL VENENOSAS? «Los antibióticos aceleran el crecimiento de pollos y pavos. Los granjeros estadounidenses ya alimentan con ellos, en gran escala, sus corrales. Mortimer P. Starr y Donald M. Reynolds, bacteriólogos de la Universidad de California, examinaron los intestinos de pavos criados con una dieta complementada con estreptomicina y descubrieron que a los tres días aparecía una bacteria resistente al fármaco. Si la alimentación con antibióticos produce variantes resistentes de parásitos tales como la *Salmonella*, este microorganismo no sólo podría envenenar a los consumidores humanos sino ser inmune a los tratamientos farmacológicos.»

...cien años

EL CANAL DE PANAMÁ. «El informe de la Comisión del Istmo del Canal ha despejado una masa de errores y distorsiones que hasta ahora se cernían sobre toda la cuestión del canal. A juzgar por la viabilidad de la construcción, seguridad, estabilidad política, comodidad y facilidad de explotación y economía de primera inversión y mantenimiento, el Canal de Panamá tal como lo han diseñado nuestros ingenieros es, con mucho, mejor proyecto que el Canal de Nicaragua. El Congreso está tan acostumbrado a considerar a Panamá como una empresa francesa que hasta ahora no ha empezado a darse cuenta de que si afianzamos nuestros propios términos de licitación en el proyecto Panamá, éste se convertirá en una empresa tan americana como la construcción de un canal *de novo* en Nicaragua.»

ALIMENTAR PITONES. «Hace algún tiempo la Sociedad Zoológica de Nueva York adquirió una pitón de casi ocho metros. El animal rehusó de plano comer nada, y si bien una serpiente puede ayunar durante un período considerable, incluso para el aguante del reptil hay límites. Las autoridades decidieron que había que tomar medidas extremas. La serpiente fue firmemente sujetada por doce hombres y con ayuda de un palo se le introdujo por la boca el alimento, compuesto éste por dos conejos y cuatro cobayas (*véase ilustración*). Luego fue devuelta a la jaula para que siguiera el proceso de digestión.»



Pitón: Alimentada a la fuerza en 1902

...ciento cincuenta años

MEDICINAS Y PANACEAS. «Es muy corriente que los vendedores de remedios de curandero los anuncien como ‘puramente vegetales’. Ello es abusar de la ignorancia de la gente. Hace ya tiempo se usaban exclusivamente medicinas vegetales, con la excepción del alumbre y el azufre. Cuando la ciencia desarrolló las virtudes de las medicinas químicas, los viejos prejuicios se organizaron contra las maldades de las ‘nuevas drogas’. Los mismos prejuicios anidan aún en las mentes de muchos, y así oímos que los ‘médicos naturistas’ son más seguros. Creen esas personas que las medicinas químicas son más peligrosas, pero ello es pura tontería, pues los venenos más virulentos se extraen de hierbas. La morfina, la nuez vómica, la estricnina, la nicotina y otros espantosos venenos son extractos vegetales.»

Lentes gravitatorias y materia oscura

Las estrellas, galaxias y agujeros negros pueden desviar la luz procedente de otros objetos celestes aún más alejados. Tal efecto, que recibe el nombre de efecto de lente gravitatoria, nos proporciona pistas acerca de la materia oscura, la estructura de los cuásares y la distribución de la materia a gran escala en el universo

Joachim Wambsganss

En una sala de espejos, el visitante disfruta con las imágenes múltiples de sí mismo; algunas, muy distorsionadas. A partir de los detalles de tales imágenes de su persona, deformes y como derretidas, podría, en principio, deducir la forma de la superficie de los espejos que las producen. E incluso si el observador desconociese el aspecto verdadero de sí mismo (que ha observado mil veces al mirarse en un espejo normal), aun en ese caso podría, a partir de las imágenes distorsionadas, reconstruir una imagen fiel de sí mismo.

También en nuestro universo podemos contemplar de vez en cuando dos, tres o incluso más imágenes —a menudo muy distorsionadas— de objetos celestes muy alejados. Esas imágenes múltiples aparecen cuando los rayos de luz son desviados por la acción de otros cuerpos celestes de enorme masa.

Ese efecto de lente gravitatoria, así se le denomina, proporciona a los astrofísicos la manera de obtener unos conocimientos de primera mano sobre el universo y sus objetos cósmicos, imposibles de adquirir por otra vía y, si acaso, con enormes dificultades. Son conocimientos sobre la escurridiza materia oscura, la distribución de la materia a gran escala o la estructura interna de los cuásares, regiones centrales extremadamente brillantes que se hallan en galaxias muy lejanas.

La astrofísica de las lentes gravitatorias constituye un campo de investigación joven. Pese a ello, los astrónomos han detectado muy diversas manifestaciones de este fenómeno de la 'luz que se curva'. Así, se ha descubierto por ejemplo el efecto focalizador de estrellas solitarias, cuya masa no supera siquiera la solar. También se han identificado galaxias con hasta un billón de soles que operan como lentes gravitatorias extraordinariamente potentes; se han visto incluso cúmulos de galaxias, que contienen cientos de éstas, que cumplen la misma función. Por otra parte, los investigadores han identificado en los objetos más pequeños —ya fuesen estrellas o galaxias o cuásares— variaciones casi imperceptibles en su luminosidad o en su forma, lo que ha sido posible sólo merced al efecto aumentativo de la desviación de la luz.

En un sistema de lentes gravitatorias, entre el observador situado en la Tierra y la lejana fuente luminosa se sitúa algún objeto cósmico, que actúa como una lente de gran aumento. Puede tratarse de una estrella, de una galaxia, de un cúmulo de galaxias o de un agujero negro. Tales concentraciones de masa desvían la luz procedente de las fuentes lejanas de su trayectoria rectilínea. De ese modo, el observador terrestre puede ver el objeto duplicado o multiplicado varias veces, pese a que, en la realidad, se trata de un único objeto. Cuando se observa toda una constelación de este tipo, los especialistas hablan de un "efecto de lente gravitatoria fuerte o intenso". Si la masa focalizadora no es lo suficientemente compacta, o si la fuente no se sitúa más o menos exactamente detrás de la lente, entonces el efecto desviador de la luz no tiene consecuencias tan drásticas y origina sólo ligeras deformaciones en la imagen de la galaxia lejana. Se habla en ese caso de un "efecto de lente gravitatoria ligero o débil".

1. CUANDO UN CUMULO DE GALAXIAS —Abell 2218 en la fotografía, debida a Andrew Fruchter y tomada con el telescopio espacial Hubble— actúa como lente gravitatoria, engendra "gigantescos arcos de luz". Las galaxias amarillentas grandes pertenecen al cúmulo; las galaxias más delgadas, en parte azules y curvadas formando un arco, se hallan situadas en realidad mucho más lejos, detrás del cúmulo; de acuerdo con la masa de éste sufren una mayor o menor deformación debido al efecto de lente gravitatoria.

Si sabemos que la luz se propaga en línea recta, ¿por qué puede desviarse de esa trayectoria en el cosmos? Por principio, la luz sigue la trayectoria más corta entre dos puntos, que en la mayoría de los casos se trata de una línea recta. Sin embargo, debido al hecho de que el universo contiene enormes concentraciones de materia y a los principios de la teoría general de la relatividad de Einstein, que predice que cada masa curva en mayor o menor medida (dependiendo de su valor mayor o menor) el espacio que tiene a su alrededor, resulta que los propios rayos de luz siguen también necesariamente caminos curvados. La intensidad de la desviación depende de la proximidad de la trayectoria del rayo de luz al objeto cósmico, así como de la masa de éste: el ángulo de desviación es directamente proporcional a la masa del objeto que la origina e inversamente proporcional a la distancia entre dicho objeto y el camino de la luz.

Esta curiosidad cósmica nos proporciona una solución, cuando menos aproximada, de algunos de los problemas más fascinantes de la astrofísica moderna: volumen, edad y geometría de nuestro universo, estructura interna de los cuásares, origen y evolución de las galaxias o búsqueda de la escurridiza materia oscura. Los investigadores creen incluso que con la ayuda de este fenómeno llegarán a observar planetas parecidos a la Tierra que dan vueltas en torno a otras estrellas.

El efecto de lente gravitatoria se deja sentir en las propiedades de las fuentes de luz:

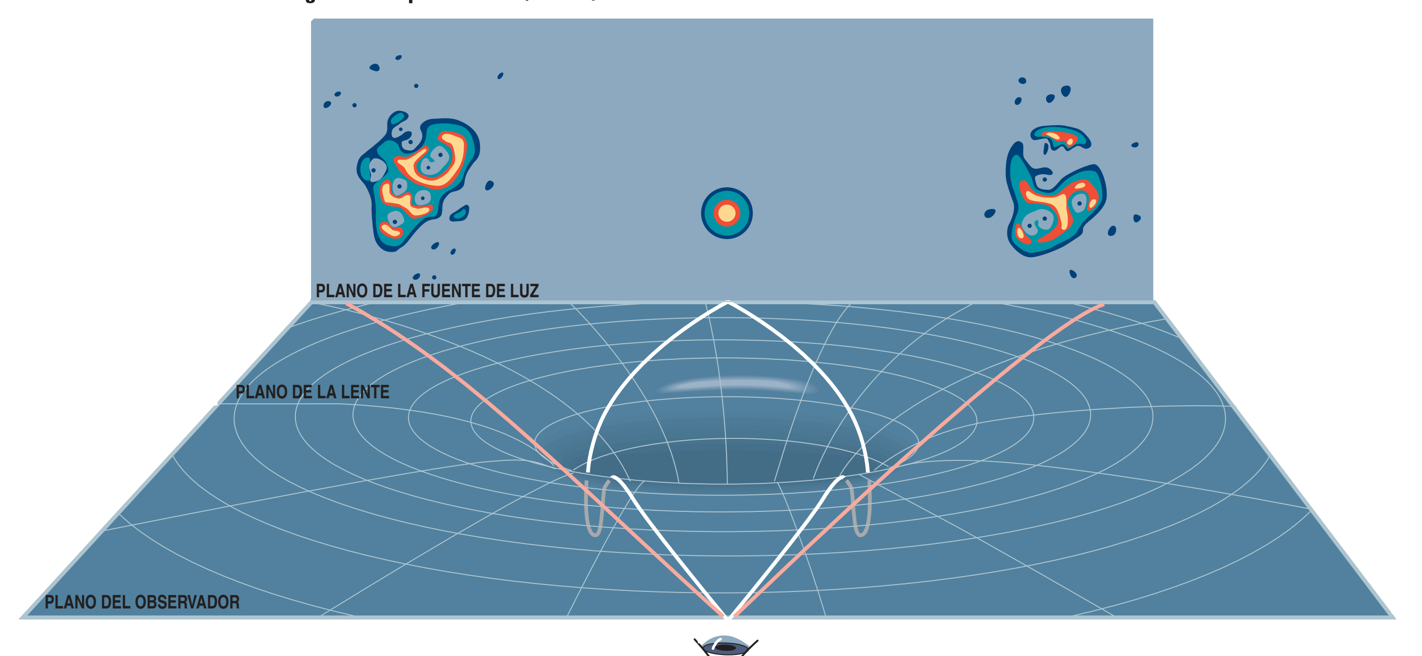
➤ **Posición:** Por medio de la desviación de la luz se modifica siempre la posición aparente de una estrella o de una galaxia en el cielo. Este efecto es inobservable la mayoría de las veces, dado que desconocemos por completo en qué lugar del cielo se vería el objeto si no se hubiese desviado la luz procedente del mismo. Sólo cuando una determinada configuración de lente gravitatoria se modifica substancialmente durante un corto intervalo temporal —entendiendo por tal, como mucho, el que corresponde a la vida activa de un astrónomo— y somos así capaces de ver, por decirlo de algún modo, el antes y el después del efecto, podemos medir la influencia de la lente gravitatoria sobre la posición.

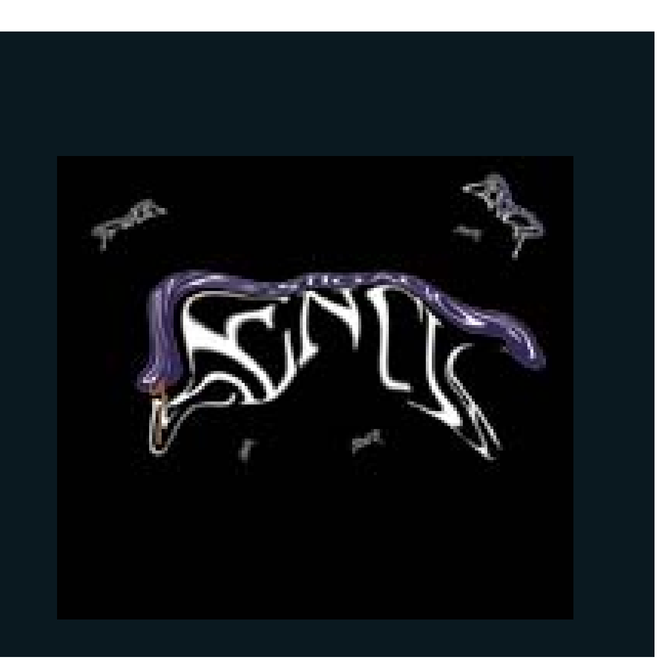
➤ **Luminosidad:** La desviación y focalización de la luz influye sobre la luminosidad, medida con un



3. EL CARTEL LUMINOSO ORIGINAL (aquí el logotipo de "Investigación y Ciencia") se ha deformado y multiplicado varias veces por la acción de un conjunto de lentes gravitatorias simulado por ordenador. Las superficies de colores (*parte superior*) corresponden a diversas intensidades del efecto aumentativo de las lentes: cuando la fuente de luz se halla en una región de color azul, su intensidad se ve poco aumen-

2. CONSTELACION de lentes gravitatorias típica. Los rayos de luz procedentes de un cuásar muy lejano (*la fuente circular situada arriba, en el medio*) son desviados en su camino hacia el observador terrestre por una galaxia que se encuentra en su camino (*líneas blancas*). El observador ve dos o más imágenes amplificadas (*arriba, a la izquierda y a la derecha*), que aparecen ubicadas en distintas posiciones del cielo (*siguiendo las líneas rojas*). Las estrellas de la galaxia actúan como microlentes gravitatorias, lo cual conduce a una imagen deformada de la estructura de la fuente, que no se ve según tal es en realidad.





tada; más, si se encuentra en una región verde, y mucho más, en una roja. Si la fuente luminosa reside en una línea amarilla, el efecto aumentativo resulta particularmente intenso. Los dominios que se hallan dentro de las líneas amarillas se reproducen varias veces. Los pequeños cuadrados amarillos (*a la derecha*) señalan las posiciones de las lentes gravitatorias.

telescopio, de las estrellas y galaxias lejanas. Aunque la mayoría de los objetos cósmicos sufren una pérdida muy pequeña de luminosidad, algunos la aumentan. Sólo un número exiguo de fuentes aparecen mucho más brillantes debido al efecto de lente gravitatoria. Se han observado ya luminosidades que centuplican la intensidad originaria. Estas son las que revisten mayor interés.

➤ **Forma:** Debido al efecto de lente gravitatoria, las galaxias aparecen separadas en direcciones tangenciales y adquieren forma de pequeño arco. En casos extremos pueden ofrecer una forma anular.

El autor

JOACHIM WAMBSGANSS enseña física de astropartículas en la Universidad de Potsdam. Su principal tema de investigación es el efecto de lente gravitatoria así como sus diversas aplicaciones. Trabaja, además, en cúmulos de galaxias y en la búsqueda de planetas extrasolares.

➤ **Número:** Fruto espectacular del efecto de lente gravitatoria, se generan imágenes dobles o múltiples de una galaxia lejana o de un cuásar. Las imágenes múltiples aparecen siempre por pares; en cada par, una es imagen especular de la otra.

Mediante simulación informática podemos recrear todos estos casos de desviación de luz por efectos gravitatorios.

Que las grandes masas de los cuerpos celestes desviaban de su trayectoria rectilínea a los rayos de luz lo anunció ya Albert Einstein en 1915, al formular su teoría general de la relatividad. Pero no fue el primero en predecirlo. En 1801 Johann Georg Soldner, astrónomo berlinés, había calculado que la posición de una estrella sufriría una desviación de ángulo muy pequeño debido a la influencia de la masa del Sol. El resultado de Einstein correspondiente al ángulo de desviación era, sin embargo, el doble del predicho por Soldner; tal efecto fue medido en 1919, durante un eclipse de sol, por los astrofísicos británicos Arthur Eddington y Frank Dyson. Este resultado constituyó un hito, pues corroboraba la teoría general de la relatividad.

En los años treinta Einstein volvió a la desviación de la luz provocada por la gravedad. Sus cálculos le llevaron a predecir la aparición de dos imágenes aumentadas de una estrella, cuando entre la estrella en cuestión y el observador mediara otra que actuaría de lente; en el caso de alineación exacta aparecería una imagen anular perfecta. Sin embargo, Einstein dudaba de que un efecto de estas características se observara nunca. Otros astrofísicos se ocuparon también por aquella época del efecto de lente gravitatoria. Fritz Zwicky sí estaba convencido de que terminaría por verse galaxias que actuarían como lentes gravitatorias. En los años sesenta se publicaron numerosos trabajos teóricos que se ocupaban del tema. Sjur Refsdal demostró que la desviación de la luz permitía obtener el radio del universo.

La primera imagen doble

Pero hasta 1979 no pudo hallarse en el firmamento la primera imagen doble. Le cupo el mérito a Dennis Walsh, de Manchester, y se trataba de un cuásar cuya luz era desviada por una galaxia situada en el camino de sus rayos. El astrónomo británico se encontró que la luz del cuásar era muy brillante; pudo distinguir dos imágenes del mismo. En los años subsiguientes fueron observados más y más fenómenos de lente gravitatoria. Los primeros “arcos luminosos gigantescos”, originados por la acción focalizadora de un cúmulo de galaxias entero, y correspondientes a las imágenes extraordinariamente deformadas de varias galaxias lejanas, fueron descubiertos en 1986, por Roger Lynds, del Observatorio Astronómico Optico Nacional de Tucson, y por Vahe Petrosian, de la Universidad de Stanford, así como también, independientemente, por un equipo liderado por Geneviève Soucail, del Observatorio Midi-Pyrénées de Toulouse. Hace unos meses, cuatro equipos observacionales distintos han demostrado que la propia estructura a gran escala del universo puede estudiarse mediante el efecto de lente gravitatoria.

Los efectos intensos de lente gravitatoria se observan en el cosmos con escasa frecuencia. Sin embargo, son fáciles de detectar, en lo que afecta a objetos individuales, bajo la forma de imágenes múltiples de un mismo objeto, de arcos de longitud considerable o de anillos que aparecen en ciertas galaxias.

Harto más común es el efecto de lente gravitatoria débil. Para su detección, los observadores del cosmos deben investigar una gran cantidad de objetos celestes y deducir del análisis estadístico de los mismos la desviación de lente gravitatoria. Según la masa del objeto que actúa de lente gravitatoria, o de acuerdo con el tipo particular de efecto observado como deformación de las fuentes luminosas

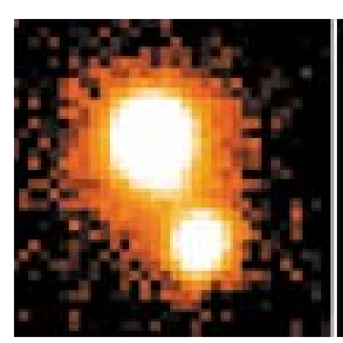
del fondo, se deduce la naturaleza del fenómeno en cuestión.

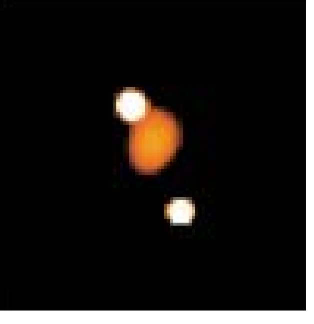
Imágenes múltiples de cuásares: Hasta hoy, los astrónomos han podido observar más de cincuenta ejemplos de cuásares dobles, triples y cuádruples. En muchos casos, las separaciones entre imágenes corresponden a escasos segundos de arco; por eso, se precisa disponer de los mejores telescopios existentes para investigar tales fenómenos. De entrada hay que recoger indicios claros de que se trata de una imagen múltiple de un mismo cuásar y no de un grupo real de tales objetos celestes. La distancia a cada objeto —desviación hacia el rojo del espectro— debe ser exactamente la misma. Luego, los propios espectros de los cuásares —sus huellas dactilares— han de coincidir con cabal precisión. La hipótesis de que se trata de una lente gravitatoria empieza a ser plausible cuando podemos hallar, entre las imágenes del cuásar, una galaxia capaz de ejercer funciones de lente gravitatoria; para ello, debe distar del observador menos que el cuásar. La prueba definitiva se obtiene cuando los cambios de luminosidad que sufre el cuásar con el tiempo se observan de idéntica forma y paralelamente en todas las imágenes del mismo, aunque a veces con un retardo temporal. Tales cuásares múltiples son muy raros y, por ello, muy difíciles de encontrar. La lente es, en la mayoría de los casos, una galaxia.



4. ESTA IMAGEN ANULAR de la galaxia del fondo B1938+666 se produce porque la galaxia que actúa de lente (*en el centro*) y la galaxia fuente (deformada hasta constituir el anillo) se hallan perfectamente alineadas una detrás de la otra. Lindsay King y su equipo tomaron la fotografía con el telescopio Hubble, en luz infrarroja.

Arcos luminosos gigantescos, arcos y arquitos: Cuando un cúmulo de galaxias entero, por acción de la masa combinada de las mismas, se convierte en objeto focalizador, el ángulo de desviación puede duplicar el correspondiente a una lente galáctica; a menudo el efecto se produce sobre varias galaxias lejanas al mismo tiempo. En razón de ello, aparecen arcos muy deformados, que se denominan así, arcos, y muchos otros arcos ligeramente deformes, los arquitos. Se ha registrado casi un centenar de cúmulos de galaxias en funciones de lentes gravitatorias. Con la ayuda de las galaxias lejanas deformadas según una misma dirección tangencial, puede determinarse la masa del cúmulo y reconstruirse la distribución de la misma. De este modo podemos establecer, fuera de toda duda, que en el cúmulo hay una forma todavía desconocida de materia que no brilla, a la que se denomina genéricamente materia oscura.





5. EL CUASAR DOBLE HE1104-1805, descubierto por Lutz Wisotzki y fotografiado con el "Telescopio de Nueva Tecnología" del Observatorio Europeo Austral de Chile (*izquierda*). Con la ayuda de técnicas de retoque de imágenes, desarrolladas por Frédéric Courbin y su grupo, podemos detectar la imagen de una galaxia muy débil que se halla entre las dos imágenes del cuásar y que es la que actúa como lente gravitatoria (*derecha*).

Anillos de Einstein: Cuando una galaxia que posee una distribución de masas con simetría esférica casi perfecta, se sitúa por delante de otra galaxia más lejana, aparece la imagen de la galaxia del fondo: un anillo de Einstein. Si se conocen las distancias a cada una de ambas galaxias, podemos, a partir del diámetro del anillo, determinar con suma precisión la masa de la galaxia que actúa de lente. En situaciones normales, sin embargo, sólo podemos deducir la masa total de una galaxia aproximadamente y tras complicados cálculos: a partir de la luz emitida por sus estrellas y por el gas que la circunda. En cambio, el efecto de lente gravitatoria nos proporciona un método mucho más elegante e importante para la determinación de dicha masa.

Efectos de microlente en cuásares: La actuación de una lente gravitatoria no es siempre tan evidente como en los ejemplos considerados hasta ahora. Cuando una estrella engendra una imagen doble, ambas imágenes se hallan tan juntas que ni siquiera con los mejores telescopios del mundo pueden apreciarse separadas. Sí podemos lograrlo cuando se trata de la imagen doble de un cuásar; para ello hemos de servirnos del efecto de variabilidad temporal de la luminosidad del cuásar. Así vemos que su luminosidad varía con el tiempo. El grado de la variación de intensidad luminosa depende de la magnitud (desconocida) del propio cuásar: si se trata de un cuásar bastante grande, su intensidad no aumenta mucho y su luminosidad varía muy despacio, pero si es un cuásar menor sus variaciones de luminosidad resultan más detectables.

Efectos de microlente en estrellas: Gracias a muchas mediciones astronómicas de distinto tipo sabemos que la Vía Láctea y otras galaxias contienen en sus regiones exteriores abundante cantidad de materia que no brilla. La naturaleza de esta materia os-

cura constituye una de las mayores incógnitas de la astrofísica actual. Nos dice la teoría que esta misteriosa sustancia debe tener propiedades completamente distintas de las que adornan a la materia ordinaria constituida por partículas elementales.

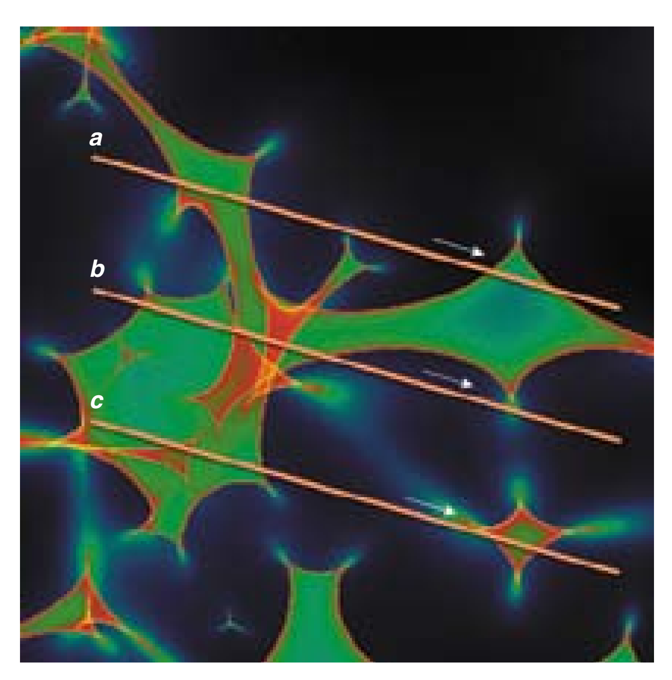
En 1986, Bohdan Paczyński, de la Universidad de Princeton, propuso que, con ayuda del efecto de microlente, debería poder demostrarse si la materia oscura de las regiones externas de nuestra Vía Láctea se halla en forma de objetos compactos, los Machos (Objetos Masivos Compactos del Halo). Cuando un macho se sitúa entre el observador y una estrella cercana —de la Gran Nube de Magallanes— entonces esa estrella nos aparecerá con brillo intensificado de una manera característica, que desaparecerá cuando ya no quede alineada con el macho en cuestión.

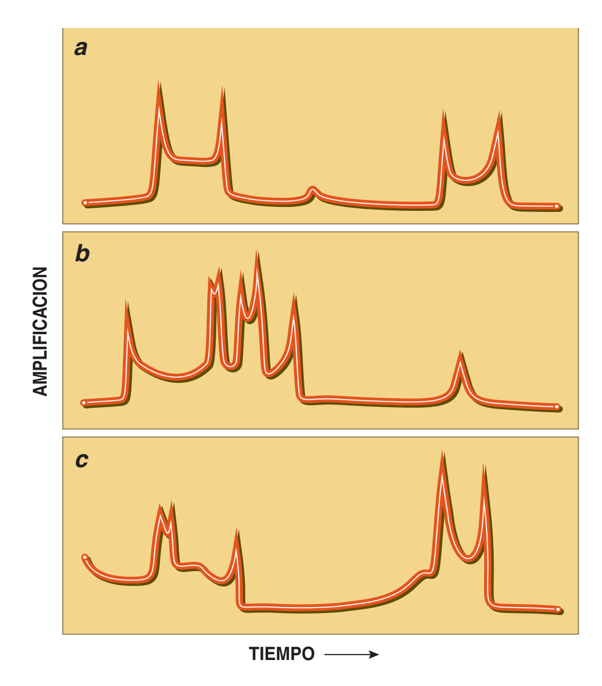
A principios de los noventa, varios equipos internacionales de investigación —entre los que se encuentra un grupo americano-australiano ("Macho"), otro francés ("Eros") y un tercero polaco-norteamericano ("Ogle")— se pusieron a trabajar con este método en busca de machos. En un intervalo de siete años se descubrió una veintena de fenómenos de microlente de este tipo, producidos por machos, en estrellas de la Gran Nube de Magallanes. Las curvas de luminosidad podían haber sido causadas por objetos de una masa de aproximadamente la mitad de la del Sol. El número total es, sin embargo, tan pequeño, que sólo pueden explicar una fracción restringida de la materia oscura existente en nuestra galaxia.

Los mismos equipos de observadores están buscando ahora en el centro de nuestra Vía Láctea fenómenos de microlente del tipo indicado. De momento se han contado ya más de 500 curvas de luminosidad apropiadas. En este caso no hay machos detrás de la lente gravitatoria, sino otras estrellas ordinarias, aunque de poca masa, situadas en el plano de la Vía Láctea. El hecho de que aparezcan en número tan inesperado, por lo elevado, muestra hasta qué punto era incompleto nuestro conocimiento de la Vía Láctea y refleja la ayuda que el efecto lente puede ofrecernos para ahondar en la comprensión de la estructura de nuestra galaxia.

Se está aplicando un esfuerzo notable en la investigación de efectos de lente colectivos causados por cúmulos lejanos, con el fin de conocer la distribución de materia a gran escala del universo. Puesto que la materia que ejerce de lente se halla muy distribuida, no se espera en este caso ninguna multiplicidad de imágenes espectacular. Si tenemos en cuenta la amplia variedad de formas que presentan las galaxias y la escasa deformación que sufren por la lente gravitatoria, entenderemos que el efecto no permita individualizar una galaxia determinada, a diferencia de lo que ocurría con los arcos luminosos gigantescos. Sólo cabe analizar la forma de un conjunto de muchos miles de galaxias muy lejanas y determinar deformaciones sistemáticas de la misma: todas las galaxias deberían experimentar una pequeña deformación parecida en una misma dirección.

Al ser tan nimio el efecto esperado, un proyecto de esta naturaleza precisa, para su ejecución, de telescopios de muy amplio campo, de innumerables noches con óptimas condiciones de observación y de enormes dosis de arte en el análisis de los datos. En cualquier caso, hace escasos meses cuatro equipos internacionales de investigadores —bajo la dirección de David J. Bacon, de la Universidad de Cambridge,





6. SIMULACION para mostrar efectos de microlente, producidos por el campo gravitatorio de una estrella sobre un cuásar lejano. Las líneas de contorno rojas corresponden a posiciones en que se intensifica el efecto amplificador. A partir de los movimientos del cuásar, la lente y el observador, el cuásar se desplaza a lo largo de líneas rectas en el campo amplificador. A la derecha, amplificación observada para tres ejemplos de variabilidad distintos.

de Nick Kaiser, del Instituto de Astronomía de Hawai, de Ludewik van Waerbecke, del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica de Toronto, y de David M. Wittman, de Lucent Technologies— han logrado observar este efecto de lente gravitatoria muy débil. La técnica promete dilucidar en un próximo futuro cuál de los modelos cosmológicos es el que mejor describe nuestro universo.

Una de las cuestiones fundamentales de la cosmología atañe al radio y edad del universo. El universo se halla en expansión. Vale decir, cuanto más dista de nosotros una galaxia, mayor es la velocidad a la que se aleja. Esta conexión entre distancia y velocidad —cuyo factor de proporcionalidad, la "constante de Hubble", recibe el nombre del descubridor de la expansión del universo— se conoce sólo con cierta precisión.

El inverso de la constante de Hubble nos ofrece el valor de la edad del universo, que, multiplicada por la velocidad de la luz, nos da una longitud: la magnitud de su radio actual, aproximadamente. Mas, pese a poder determinar la velocidad de una galaxia o cuásar con notable precisión, a partir del corrimiento de su luz hacia el rojo, su distancia de nosotros resulta muy difícil de acotar.

Como ya había demostrado en 1964 Sjur Refsdal, mucho antes de que se descubriera la primera lente gravitatoria, el efecto lente nos proporciona una posibilidad muy elegante de determinar una escala de distancias cósmica dentro de nuestra colección de medidas de corrimientos hacia el rojo. Se toma para ello un sistema formado por dos imágenes de lente gravitatoria de un cuásar muy lejano y se establece la diferencia de tiempos que media entre las dos imágenes.

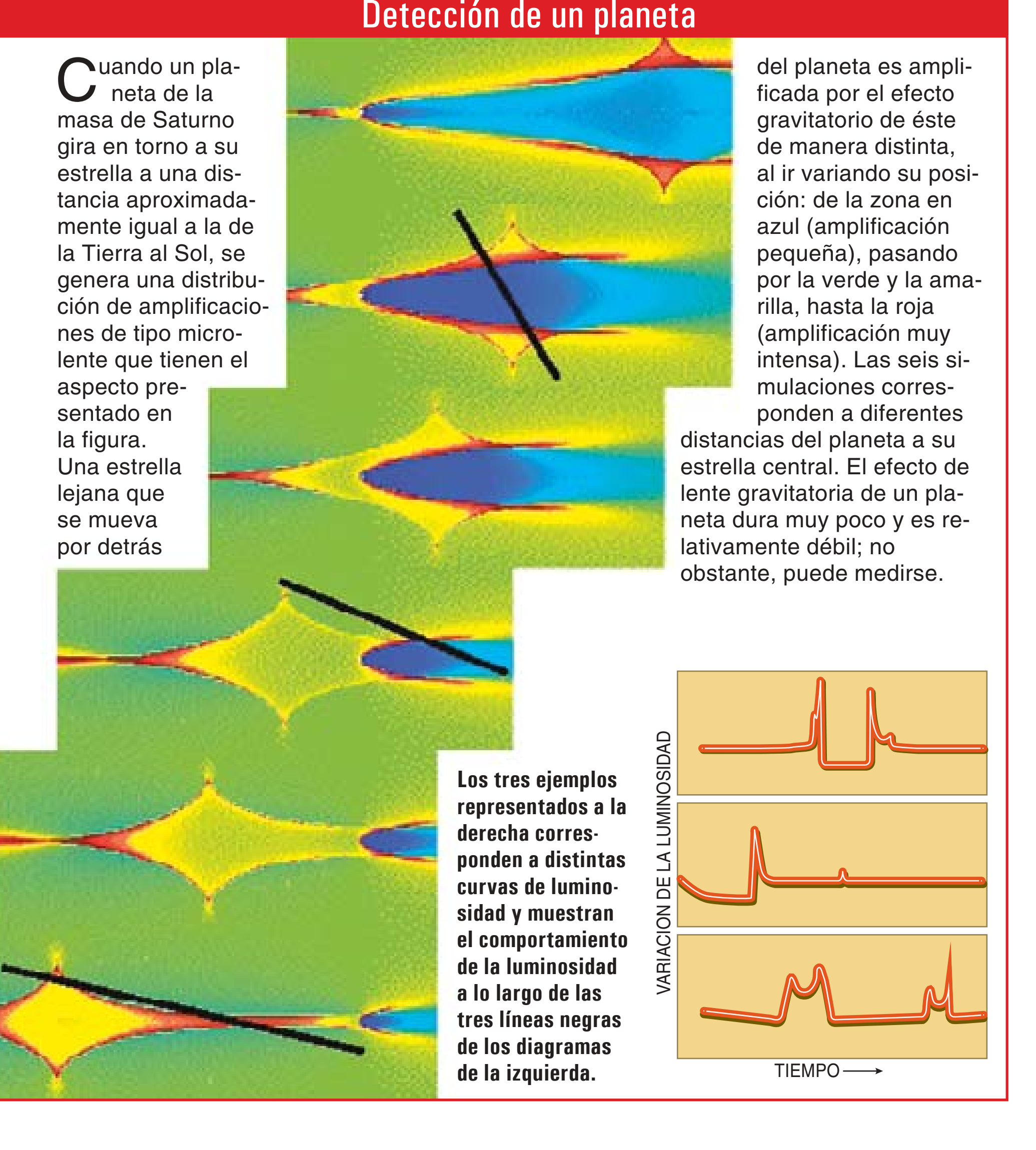
Expliquémoslo con mayor detenimiento. Cuando una galaxia genera una imagen doble de un cuásar que se halla detrás de ella, los dos haces luminosos aparecen a dos lados distintos, digamos izquierdo y derecho, de la lente gravitatoria. En general, ambos caminos luminosos difieren en su longitud, lo que provoca que las dos señales procedentes del cuásar alcancen la Tierra en tiempos distintos. A esta diferencia de tiempos hay que añadir aún la gravitatoria, correspondiente a la teoría general de la relatividad: puesto que un haz pasa más cerca del centro de la lente, y así queda expuesto a campos gravitatorios más intensos, la luz sufre un frenado mayor que en el caso del otro haz, que pasa más lejos del centro de la lente. Ambos efectos —el geométrico y el gravitatorio— son del mismo orden de magnitud.

A partir de la determinación de la diferencia temporal de los dos haces, puede deducirse la distancia absoluta que hay al cuásar. ¿Cómo? En un dispositivo observacional estático, sólo tiene sentido considerar magnitudes adimensionales, aquí la distancia angular y las variaciones relativas de luminosidad entre las imágenes, así como la distribución de luminosidad relativa en la galaxia-lente. De ahí puede obtenerse una distribución de masas correspondiente al sistema lente, que reproduce todos los valores de las magnitudes observadas. Un modelo de lente gravitatoria de este tipo proporciona también la diferencia de tiempos entre los caminos luminosos relativa al tiempo total correspondiente a uno de los recorridos.

Curvas de luminosidad desplazadas en el tiempo

El modelo considerado no es, sin embargo, unívoco. Si se multiplica por dos, la escala absoluta de distancias, magnitudes y masas

Detección de un planeta



Cuando un planeta de la masa de Saturno gira en torno a su estrella a una distancia aproximadamente igual a la de la Tierra al Sol, se genera una distribución de amplificaciones de tipo microlente que tienen el aspecto presentado en la figura. Una estrella lejana que se mueva por detrás del planeta es amplificada por el efecto gravitatorio de éste de manera distinta, al ir variando su posición: de la zona en azul (amplificación pequeña), pasando por la verde y la amarilla, hasta la roja (amplificación muy intensa). Las seis simulaciones corresponden a diferentes distancias del planeta a su estrella central. El efecto de lente gravitatoria de un planeta dura muy poco y es relativamente débil; no obstante, puede medirse.

Los tres ejemplos representados a la derecha corresponden a distintas curvas de luminosidad y muestran el comportamiento de la luminosidad a lo largo de las tres líneas negras de los diagramas de la izquierda.

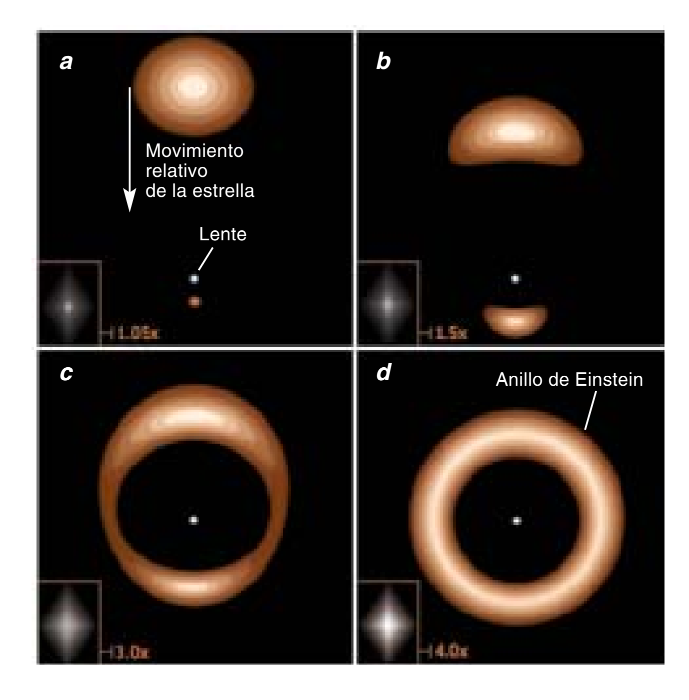


7. EN ESTA FOTOGRAFIA la lente gravitatoria la constituye el cúmulo de galaxias amarillo —denominado por sus coordenadas celestes 0024+1654— mientras que los numerosos arcos azules a su alrededor son imágenes muy deformadas de una galaxia mucho más lejana y situada por detrás del cúmulo.

de la galaxia-lente, el observador terrestre obtendrá exactamente la misma imagen. De otra forma, una fotografía del sistema de lente gravitatoria no puede distinguir un caso del otro. Con todo, en el segundo caso se modifica el valor absoluto de la diferencia temporal entre los dos caminos luminosos, que se multiplica por dos. Es decir: si se consigue determinar el valor absoluto de la diferencia de tiempos entre los dos caminos (y no sólo la diferencia relativa al tiempo total), se podrá determinar el tiempo total del trayecto.

En el caso de una imagen doble de cuásar, el modelo predice que la diferencia de tiempos es de una cien mil millonésima parte del tiempo total del camino. Basta, pues, con multiplicar la diferencia medida por cien mil millones —y por la velocidad de la luz— para obtener la distancia al cuásar. Si se conocen, además, los desplazamientos al rojo, y con ellos las velocidades de recesión, de la lente y del cuásar, podremos establecer el valor de la constante de Hubble.

Ahora bien, la diferencia de tiempos en el recorrido de los rayos podemos medirla sólo si el cuásar lejano sufre variaciones patentes de su luminosidad con el tiempo. En ese caso nos es dado, mediante mediciones repetidas de las dos imágenes del cuásar, determinar los perfiles de ambas curvas de luminosidad y, con ello, el desplazamiento relativo de la señal. En la práctica eso no resulta nada fácil, por varias razones. De ahí que se haya tardado casi veinte años en fijar esta diferencia de tiempos. El valor para la constante de Hubble que se dedujo de esa primera medición era, sin embargo, bastante impreciso todavía. Con posterioridad se han venido realizando nuevos registros de diferencias temporales de recorridos luminosos para diversos sistemas de lentes gravitatorias. La tendencia de los resultados favorece un valor bastante bajo de la constante de Hubble, de unos 65 kilómetros por segundo y megaparsec. Esto corresponde a una edad del universo elevada. A buen seguro, con este método de Refsdal de las lentes gravitatorias muy pronto podremos determinar el valor



8. UN PEQUEÑO OBJETO ESTELAR constituido en lente gravitatoria (*punto blanco*) y una estrella que se encuentra atrás se acercan en el cielo debido a su movimiento relativo. Al principio se percibe una imagen muy poco distorsionada de la situación, junto a una imagen suplementaria muy débil dentro de la lente. Cuando aumenta la distancia angular entre la lente y la fuente, la segunda imagen gana en tamaño y luminosidad, mientras que la primera se va deformando de manera apreciable. Por fin, se forma un anillo de Einstein, que aparece cuando la fuente se sitúa en alineación perfecta por detrás de la lente.

de la constante de Hubble cuya precisión sea, cuando menos, la que se logra a través de otros procedimientos.

La materia oscura constituye probablemente la porción principal de la masa total del universo. Pero no emite luz alguna. No sabemos, pues, casi nada acerca de su naturaleza o de su distribución en el espacio. La mayoría de las mediciones astronómicas se basan en la detección de la radiación electromagnética que recibimos procedente de los objetos cósmicos; sin embargo, la materia oscura revela su existencia sólo a través de la fuerza gravitatoria que ejerce, en particular sobre los rayos de luz, desviándolos.

Eso significa que el efecto de lente gravitatoria constituye una de las pocas oportunidades de que disponemos para desentrañar el secreto de la materia oscura. Mediante este método —combinado con análisis de velocidades de las galaxias o de sus emisiones de rayos X— ha sido posible, para el caso de cúmulos de galaxias, determinar con cierta aproximación su masa total. Pero tal valor sobrepasa, con mucho, el valor que se obtiene para la masa total correspondiente a estrellas que emiten luz, lo que es un indicio claro de que la diferencia de masas debe estar en forma de materia no luminosa. Ahora bien, partiendo de las ligeras deformaciones de las galaxias más lejanas, se ha podido determinar la distribución de la materia oscura dentro de los cúmulos de galaxias; se sabe, además, que dicha materia se encuentra situada cerca de la materia luminosa. Pese a todo, no ha sido posible avanzar mucho en lo que concierne a la naturaleza de dicha materia oscura.

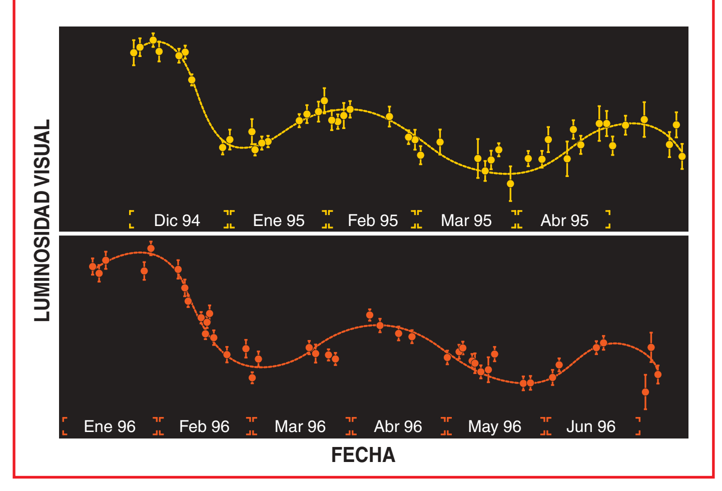
Si existieran galaxias oscuras enteras —como enormes concentraciones de gas que se hubieran visto privadas de la posibilidad de agregarse para formar estrellas— o bien agujeros negros aislados con masas correspondientes a una galaxia entera, deberían haberse detectado en la forma ya dicha de imágenes múltiples de cuásares. Pero como resulta que cada vez que se ha detectado una imagen de cuásar múltiple se ha visto también que la lente gravitatoria era una galaxia normal, se deduce que tales concentraciones de materia oscura o de agujeros negros supermasivos no pueden existir más que, si acaso, en una cifra exigua.

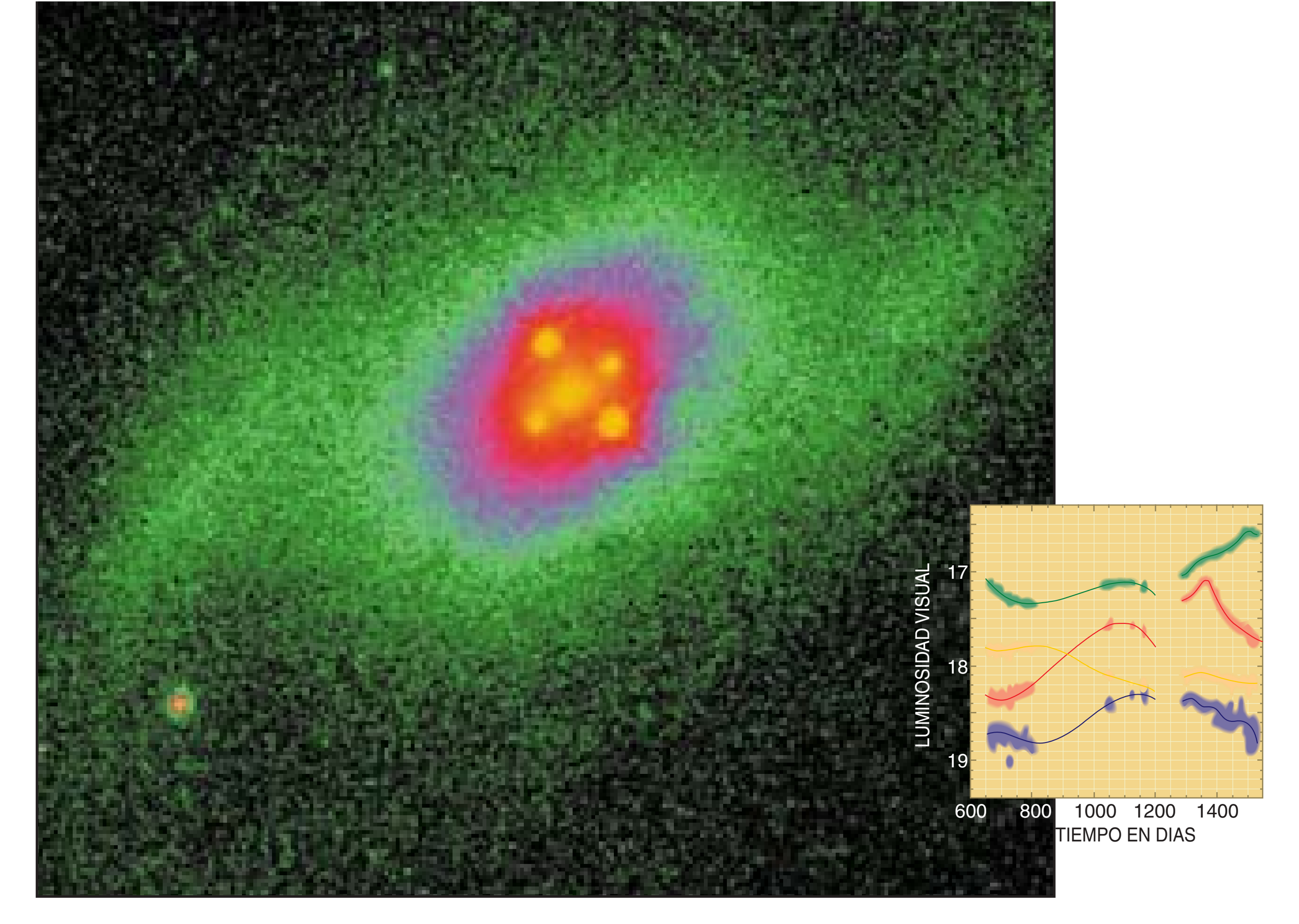
Si la materia oscura de las regiones externas de nuestra Vía Láctea estuviera formada por machos, éstos deberían haberse detectado en los numerosos episodios de microlente, pero la cifra de los observados es muy baja, señal de que los machos sólo pueden constituir una parte pequeña de la materia oscura que existe en la Vía Láctea.

Del análisis de las curvas de luz correspondientes a cuásares múltiples podrían inferirse, en principio, los machos de otras galaxias. Pero también en este

Curvas de luminosidad desplazadas en el tiempo correspondientes a un cuásar doble

Las curvas de luminosidad de las dos imágenes del cuásar doble Q0957+561 (*datos en rojo y en amarillo*) aparecen desplazadas en el tiempo 417±3 días. A partir de esta diferencia de tiempos —y de un modelo geométrico para la lente, con el que se convierte el cálculo de la diferencia de tiempos en tiempo total de los caminos luminosos—, nos es dado calcular la constante de Hubble, que nos ofrece una medida del tamaño y de la edad del universo. Estos datos fueron tomados por Tomislav Kundic y su grupo.





9. EL CUASAR CUADRUPLE Q2237+0305 se halla, en esta fotografía del telescopio Hubble, en torno al centro de una galaxia bastante cercana. A partir de las curvas de luminosidad de las cuatro imágenes de Q2237+0305, obtenidas en el transcurso de los tres últimos años —por Przemek Wozniak y su grupo— se puede determinar la masa de las microlentes, así como las dimensiones y el perfil de luminosidad del cuásar (*derecha*).

caso los escasísimos sucesos registrados rechazan la posibilidad de que la materia oscura se halle en esa forma. Y si bien es cierto que el efecto de lente gravitatoría no ha sido capaz hasta el momento de revelar el secreto de la materia oscura, se está en camino.

Detección de planetas parecidos a la Tierra

En la dirección del centro galáctico se han descubierto unos 500 sucesos de microlente, dijimos antes. En ellos se presume que las lentes son estrellas ordinarias. Si una de éstas tiene un planeta que da vueltas a su alrededor, puede ocurrir que aparezcan variaciones de ciclo corto de la luz amplificada de la estrella más lejana. Y aunque las variaciones de luminosidad provocadas por el planeta sean, la mayoría de las veces, de sólo un pequeño porcentaje, pueden medirse. El equipo PLANET, dirigido por Penny Sackett en Groningen, el MPS, capitaneado por David Benett en Notre Dame, y MOA, dirigido por Phil Yock en Auckland, utilizan este método en su búsqueda de planetas en otras estrellas. Pero hasta ahora ninguno de los hallazgos relatados se ha visto libre de controversia. Se trata, a la postre, de una cuestión de tiempo; nadie duda de que podremos averiguar la existencia de planetas extrasolares por este método de las lentes gravitatorias.

Gracias al mismo, podrán descubrirse con telescopios terrestres planetas de una masa similar al que habitamos. Los métodos de búsqueda restantes carecen de la sensibilidad necesaria. Lo que se explica por la influencia del planeta sobre la posición y la velocidad de la estrella central —efecto en el que se basan la mayoría de los métodos—, casi imperceptible para planetas de masa pequeña como la Tierra. Con el método de la microlente se nos permite, además, detectar el incremento de luminosidad que un tal planeta chico origina sobre la imagen de la estrella lejana.

Finalmente, el efecto de lente ha de contribuir también a resolver la cuestión sobre la existencia y valor exacto de la "constante cosmológica". En los años veinte Einstein introdujo en sus ecuaciones ese concepto que necesitaba para describir un universo estático. Más tarde, cuando Edwin Hubble descubrió el fenómeno de la expansión del universo, Einstein revisó su idea y suprimió la constante. Pero las pruebas indiciarias de que ahora disponemos apuntan a su realidad.

La constante cosmológica, que actúa como una expansión acelerada del universo, impide posiblemente un frenado de la expansión y el consiguiente colapso del universo en un tiempo futuro. Su influencia pre-

cisa depende del valor que tenga en la actualidad y de la densidad de materia del universo en su conjunto.

Y aquí es donde entra en juego el efecto de lente gravitatoria. Dado que la geometría y la velocidad de expansión del universo dependen del valor exacto de la constante cosmológica, ésta influye sobre la frecuencia de la aparición de imágenes múltiples de cuásares —generadas por lentes gravitatorias— y sobre la distribución de distancias entre las lentes gravitatorias. Los recientes resultados de Emilio Falcó, Chris Kochanek y José Muñoz, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, en Cambridge (Massachusetts), proporcionan una cota superior sobre el valor posible de la constante, procedente del efecto de lente gravitatoria. Su conclusión es que si la constante cosmológica fuera mayor que tal valor, deberían haberse encontrado más imágenes múltiples de cuásares. Este valor de la constante cosmológica es de momento compatible con otras determinaciones basadas en la geometría del universo y que tienen en cuenta la distribución de luminosidades de las supernovas.

El exiguo número de lentes gravitatorias encontrado favorece un valor pequeño de la constante cosmológica —que incluso podría ser nula, atendiendo sólo a eso—, mientras que el método de las supernovas privilegia un valor mayor de dicha constante. Hay ahora en marcha varios proyectos de observación de importantes porciones del cielo que habrán de ofrecernos nuevas imágenes múltiples de cuásares. Con ello mejorarán substancialmente los análisis de frecuencia de estos fenómenos de imágenes múltiples de cuásares obtenidas con lentes gravitatorias, a la vez que aportarán una respuesta más ajustada sobre el valor preciso de la constante cosmológica.

En apenas veinte años el efecto de lente gravitatoria se ha convertido en un método crucial de investigación en astrofísica. A él se le deben resultados del máximo interés cosmológico; pensemos en los relativos a la determinación de la constante de Hubble, la constante cosmológica, la búsqueda de la materia oscura, las mediciones de la masa total y de la distribución de masas en los cúmulos de galaxias, así como los concernientes a la distribución de la estructura a gran escala del universo. Un método que se revela útil para la comprensión del comportamiento de los propios cuásares; merced al mismo se obtienen perfiles de dimensiones y de brillo de las regiones más internas de los mismos. Sin olvidar que, con las nuevas lentes gravitatorias temporales, se ha avanzado en el conocimiento de la formación de las galaxias y de su evolución posterior, de la estructura de la Vía Láctea. Con el efecto lente nos resulta posible medir desviaciones originadas por la gravedad en un dominio enorme de escalas, en un rango de veinte potencias de diez, que va desde las dimensiones de un planeta al de las mayores estructuras del universo.

Para determinar las consecuencias del efecto los astrónomos disponen de técnicas varias: fotografías directas, espectros o series temporales. Se pueden emplear telescopios de muy diversas magnitudes. Para encontrar desviaciones de los rayos correspondientes a todas las zonas del espectro, se han utilizado desde emisiones de radio de longitudes de onda muy largas, pasando por el infrarrojo, la luz visible y la ultravioleta, hasta los rayos X de altísima frecuencia. Esa gama representa más de 15 órdenes de magnitud en la escala de longitudes de onda. El futuro del efecto de lente gravitatoria no ha hecho más que empezar.

Bibliografía complementaria

LENTES GRAVITATORIAS. Edwin L. Turner, en *Investigación y Ciencia*, número 144, págs. 14-21; septiembre de 1988.

GRAVITATIONAL LENSES. Peter Schneider, Jürgen Ehlers y Emilio E. Falcó. Springer, 1992.

NÜTZLICHE ILLUSIONEN: ASTROPHYSIK MIT GRAVITATIONSLINSEN. Joachim Wambsganss, en *Physik in unserer Zeit*, n.º 3, pág. 100; 2000.

FARMACOS CONTRA VIRUS

En la lucha contra los virus disponemos ya de un buen armamentario de medicinas eficaces y de otras en fase de desarrollo. La investigación en genomas víricos acelera el progreso

William A. Haseltine

A mediados de los años ochenta, cuando se cobró conciencia de que un virus cruel producía una nueva enfermedad, el sida, las estanterías de las farmacias estaban repletas de medicamentos capaces de enfrentarse a las infecciones bacterianas; para las enfermedades víricas, sólo había unas cuantas vacunas. Pero las cosas han dado un vuelco radical. Contamos con numerosos tratamientos antivíricos, incluidas varias vacunas nuevas; muchos más se encuentran en vías de desarrollo. Si medio siglo atrás los antibióticos vivieron su edad de oro, se abre ahora una etapa de esplendor para los antivíricos.

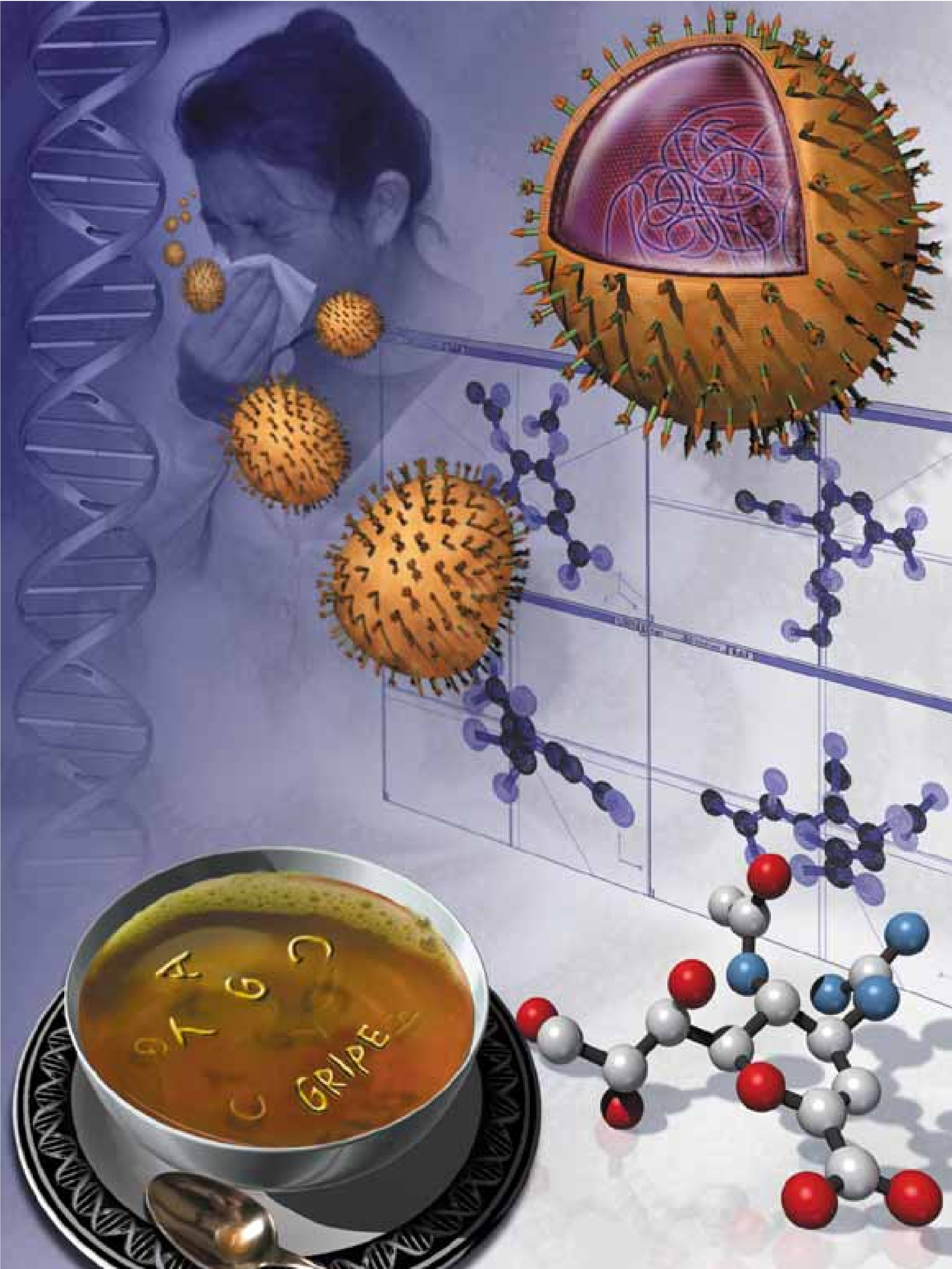
Esta riqueza brota de varias fuentes. Los laboratorios farmacéuticos destacarían la adquisición de técnicas refinadas para descubrir todo tipo de medicinas. Al propio tiempo, los esfuerzos empeñados en la búsqueda de terapias eficaces contra el sida han sugerido vías posibles de lucha no sólo contra el agente responsable de esta enfermedad, el VIH, sino contra otros virus también.

El autor

WILLIAM A. HASELTINE, doctor en biofísica por la Universidad de Harvard, dirige la revista *Journal of Regenerative Medicine*. Ha sido profesor en el Instituto Dana-Farber de Oncología, adscrito a la Universidad de Harvard. En su laboratorio se secuenció el genoma del virus del sida.

Ha entrado con fuerza una disciplina quizá desconocida por el público, pero muy valiosa: la genómica vírica, que descifra la secuencia de "letras", o ácidos nucleicos, que componen el "texto" genético de un virus, donde reside la clave para fabricar sus propias proteínas. A su vez, estas proteínas sirven de elementos estructurales y constituyentes operativos del virus y controlan su proceder. Con la secuencia completa del genoma, o incluso parcial del mismo, nos viene dada importante información sobre la infección vírica y sobre las etapas del proceso vulnerables para el ataque médico. El genoma completo de cualquier virus puede secuenciarse en días, lo que permite observar con una rapidez sin precedentes sus puntos débiles.

La mayoría de los antivíricos aprobados están dirigidos contra el VIH, los virus del herpes (responsables de patologías muy dispares, desde las molestias de un resfriado a una encefalitis) y los virus de las hepatitis B y C (ambos pueden causar cáncer de hígado). El VIH y estas formas de hepatitis seguirán siendo, sin duda, objeto de atención preferente por parte de la investigación durante algún tiempo; tomadas en su conjunto, estas enfermedades afectan a millones de personas en todo el mundo. Los biólogos, sin embargo, se afanan también en la lucha contra otras enfermedades víricas. Aunque no voy a detenerme en todos los tipos de fármacos antivíricos, espero ofrecer una idea de los avances extraordinarios que debemos a la genómica y otras técnicas refinadas.


GRIPE

Búsqueda de fármacos

Los primeros fármacos antivíricos (contra el herpes, sobre todo), aparecidos en los años sesenta, surgieron de los métodos tradicionales empleados para el descubrimiento de nuevos medicamentos. Los virus, de estructura elemental, constan de genes y quizás algunas enzimas (catalizadores biológicos) encerrados en una cápside proteica, a veces rodeada por una envoltura lipídica. Semejante disposición requiere que los virus se repliquen en el interior de las células. Por eso, los investigadores infectaban células, las cultivaban en un medio apropiado y exponían los cultivos a agentes químicos que inhibieran las actividades víricas conocidas entonces. Aquellos agentes químicos que reducían la cantidad de virus en el cultivo se reservaban para ensayos ulteriores. Pero ese enfoque experimental, que procedía por aciertos y fracasos, aportaba escasa información sobre otras actividades víricas dignas de ataque, con el bloqueo consiguiente de otros empeños por desarrollar fármacos más eficaces o menos lesivos en sus efectos secundarios.

Con la genómica se saltó esa barrera. Convertida en trampolín para el descubrimiento de objetivos nuevos en que centrar el ataque, ha abierto el camino para el desarrollo de fármacos antivíricos muy diversos. Con su ayuda se ha identificado la mayoría de los objetivos seleccionados en los virus desde los años ochenta. (El término no se acuñó hasta finales de ese decenio, bastante después de que se desarrollaran algunos de los fármacos antivíricos hoy día disponibles.)

Descifrada la secuencia del virus de interés, se coteja con las ya identificadas en otros organismos, incluidos otros virus, para así averiguar su segmentación en genes. Las ristras de nucleótidos de la secuencia que se parezcan a genes conocidos en otros organismos constituirán probablemente genes en el virus y darán lugar a proteínas con estructuras similares. Una vez localizados los genes de un virus, pueden abordarse las funciones de las proteínas correspondientes y construir así un mapa de los pasos moleculares a través de los cuales el virus de interés se asienta y prospera en el organismo.

En ese mapa pueden aparecer resaltadas las proteínas —y los dominios en esas proteínas— que sería bueno inutilizar. En general, los investigadores se inclinan por los objetivos cuya alteración mine la actividad del virus. También optan por centrar su atención sobre dominios proteicos con escaso parecido con los del hombre, y evitar así un posible daño en las células sanas y otros efectos secundarios intolerables. No desdeñan los dominios proteicos que compartan básicamente todas las cepas importantes del virus, de suerte que el fármaco abarque, en su eficacia, el arco más amplio posible de las variantes víricas.

Supongamos que se ha identificado un objetivo vírico. Podemos entonces recurrir a varias técnicas para crear el fármaco correspondiente, capaz de anularlo. Podemos apelar a la ingeniería genética estándar (introducida en los años setenta) para producir copias de una proteína seleccionada y usarla después en el desarrollo de un fármaco. Se inserta el gen correspondiente en bacterias u otros tipos de células, que sintetizan copias innúmeras de la proteína codificada. Las moléculas de proteína resultantes pueden constituir la base de pruebas de muestreo: sólo las moléculas que se unan a ellas recibirán una atención ulterior.

Podríamos seguir otra vía, la de analizar la estructura tridimensional de un dominio proteico y diseñar fármacos que se acoplaran de manera precisa a esa región; por ejemplo, construir un compuesto que inhibiera el centro activo de una enzima crucial para la reproducción del virus. Y cabe también combinar los métodos de muestreo antiguos con los más recientes basados en la estructura.

De la aplicación de técnicas avanzadas en la industria farmacéutica se han extraído ideas para desarmar al virus en cualquiera de las etapas de su ciclo biológico. Aunque las estrategias reproductivas difieren de forma sutil de una especie vírica a otra, en general las etapas de la replicación de los virus comprenden la unión a las células del huésped, la liberación de los genes víricos en el interior de las células, la replicación de todos los genes víricos y sus proteínas (con la ayuda de la maquinaria celular para producir las propias proteínas), la agrupación de los componentes en hordas de partículas víricas y la migración de éstas para comenzar un nuevo ciclo en otras células.

El momento ideal para atentar contra el virus es al comienzo de la infección, antes de que haya tenido tiempo de diseminarse por el organismo y provocar los primeros síntomas. Las vacunas actúan en ese instante preciso, al estimular el sistema inmunitario para que destruya el agente patógeno en cuanto se ha introducido en el organismo. A lo largo de su historia, las vacunas han ofrecido ese incentivo al inocular una versión debilitada o muerta del agente infeccioso, incapaz de alcanzar un número suficiente de réplicas para causar la enfermedad. En las vacunas subunitarias hallan éstas su opción alternativa más frecuente. Contienen fragmentos del patógeno. Tales trozos, incapaces de producir la infección, pueden inducir una respuesta inmunitaria protectora si se seleccionan cuidadosamente.

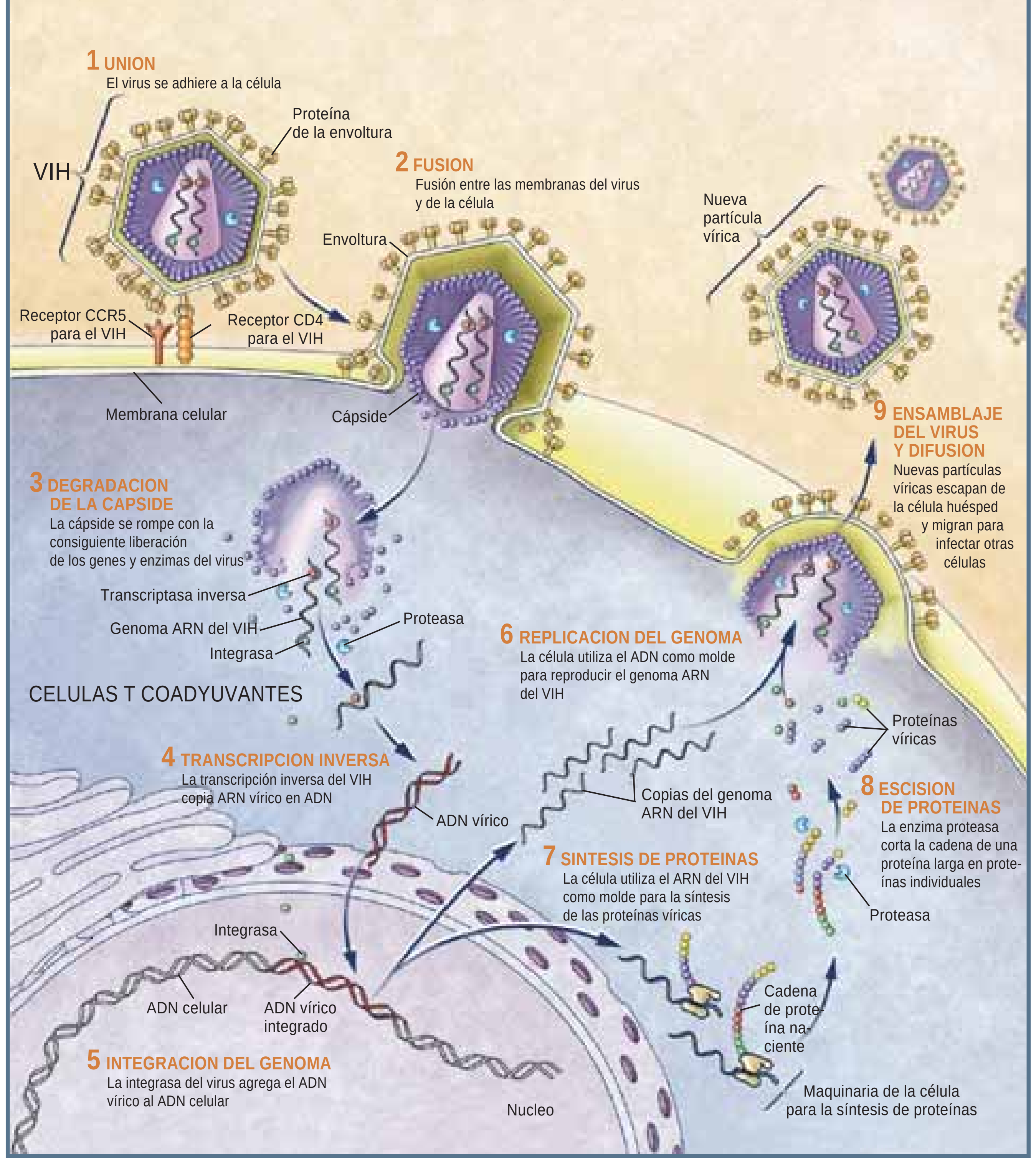
Para la hepatitis B se consiguió una primera vacuna subunitaria tras aislar el virus del plasma san-

Resumen/Fármacos contra los virus

- Tras el desciframiento de las secuencias génicas, o genomas, del hombre y de numerosos virus, pueden pergeñarse fármacos contra el sida, hepatitis y gripe.
- Una vez determinada la secuencia génica de un virus, se recurre al ordenador para comparar dicha secuencia con la de otros virus. Tal cotejo de secuencias, propio de la genómica, permite identificar en el nuevo virus genes que cifran moléculas dignas de considerarse objetivo de un nuevo fármaco.
- Los virus tienen ciclos biológicos complejos, aunque vulnerables al ataque medicamentoso en sus diferentes etapas.

ASI OPERA UN VIRUS

CICLO BIOLOGICO DEL VIH, descifrado con ayuda de análisis genómicos. Presenta una complejidad insólita en sus detalles, aunque todos los virus recorren los mismos pasos principales para infectar las células y reproducirse. Entran en una célula (se clavan en ella e inyectan en su interior todos los genes), copian genes y proteínas víricos (con la colaboración de los mecanismos y materias primas de la célula) y empaquetan las copias nuevas en partículas víricas capaces de diseminarse e infectar otras células. Los componentes víricos implicados en cada uno de estos pasos pueden servir de objetivos para fármacos.



Fármacos antivíricos

Ofrecemos un listado de fármacos antivíricos comercializados. Muchos deben su existencia, al menos en parte, a la genómica. Otros 30 medicamentos víricos basados en el conocimiento de la genómica se encuentran ya en fase de prueba en humanos.

FARMACO	PAPEL ESPECIFICO	ENFERMEDADES VIRICAS
INTERRUPTORES DEL GENOMA		
abacavir, didanosina, estavudina, zalcitabina, zidovudina	Inibidores de la transcriptasa inversa análogos de nucleósidos	Infección de VIH
aciclovir, ganciclovir, penciclovir	Inhibidores de la enzima que duplica el ADN vírico análogos de nucleósidos	Infecciones de herpes; inflamación retiniana causada por citomegalovirus
cidofovir	Inhibidores de la enzima que duplica el ADN vírico análogos de nucleósidos	Inflamación retiniana causada por citomegalovirus
delavardina, efavirenz	Inhibidores no nucleosídicos y no nucleotídicos de la transcriptasa inversa	Inhibición del VIH
lamivudina	Inhibidor de la enzima transcriptasa inversa análogo de nucleósido	Infecciones de VIH y hepatitis B
ribavirina	Nucleósido sintético que induce mutaciones en genes víricos	Infecciones de hepatitis C
INTERRUPTORES DE LA SÍNTESIS DE PROTEINAS		
amprenavir, indivnavir, lopinavir, nelfinavir, ritonavir, saquinavir	Inhibidores de la proteasa del VIH	Infección de VIH
fomivirsen	Molécula antisentido que bloquea la traducción del ARN vírico	Infección retiniana causada por citomegalovirus
interferón alfa	Activador de las defensas inmunitarias intracelulares que bloquean la síntesis de proteínas del virus	Infecciones de hepatitis B y C
BLOQUEADORES DE LA DIFUSION CELULAR DEL VIRUS		
oseltamivir, zanamivir	Inhibidores de la liberación del virus	Gripe
palivizumab	Anticuerpo monoclonal humanizado que marca al virus para su destrucción	Infección respiratoria sincitial

guíneo de personas infectadas y purificar las proteínas deseadas. Hoy la vacuna subunitaria para la hepatitis B se obtiene por ingeniería genética. Se utiliza el gen de una proteína específica de la hepatitis B para fabricar copias puras de la proteína. Con la ayuda de la genómica se desarrollan ahora vacunas adicionales para el dengue, el herpes genital y la fiebre hemorrágica, a menudo mortal, causada por el virus de Ebola.

En curso de investigación se encuentran también vacunas para prevenir o tratar el sida. Pero los genes de su agente, el VIH, mutan con suma rapidez y se diversifican en numerosas cepas víricas. Una vacuna que induzca una reacción contra ciertas cepas podría carecer de efecto contra otras. Al comparar los genomas de diversas cepas de VIH, podríamos hallar secuencias compartidas por la mayoría y aplicar éstas a la síntesis de fragmentos proteicos víricos puros, que, una vez obtenidos, podrían someterse a prueba y ver si inducen protección inmunitaria frente a las cepas existentes. Podrían diseñarse, asimismo, vacunas contra ciertas regiones de cepas prominentes.

Impedir la entrada

El tratamiento adquiere particular interés cuando no existe la vacuna idónea. Los antivíricos curan a algunos pacientes, si bien en su mayoría se limitan a reducir la gravedad o duración de la infección vírica. Un grupo de estas terapias frena la actividad del virus al impedir la entrada en un determinado tipo celular.

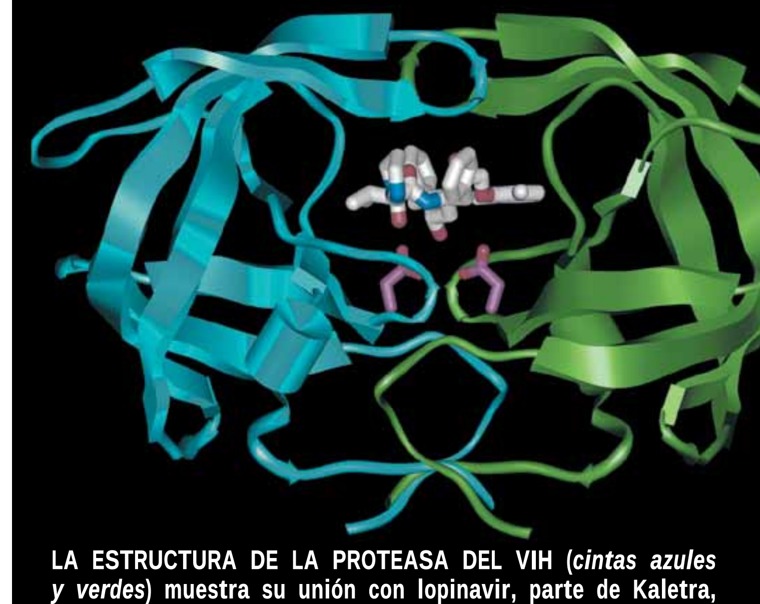
Bajo el término “entrada” se amparan varios pasos, que comienzan con el anclaje del virus en un sitio de enlace, o receptor, de la célula huésped y terminan con la degradación de la cápside proteica en el interior de la célula, donde se liberan los genes del virus. La entrada de los virus que portan una envoltura complementaria requiere un paso más. Antes de que se produzca la eliminación de la cápside, han de fundir la envoltura adicional con la membrana celular o con la membrana de la vesícula que lo introduzca en el interior de la célula.

Se trabaja en posibles fármacos inhibidores de la entrada del VIH en las células. El examen atento de la interacción entre VIH y su huésped favorito (leu-

cocitos de la sangre, las llamadas células T coadyuvantes) nos indica que el virus ancla las moléculas CD4 y CCR5 en dichas células. Aunque el bloqueo de CD4 no ha conseguido evitar que el VIH penetre en las células, el bloqueo del CCR5 podría conseguirlo.

De los cuatro antigripales iniciales, la amantidina y la rimantidina interrumpen otras partes del proceso de entrada. Los farmacólogos hallaron los compuestos al realizar un muestreo de productos químicos con capacidad potencial para bloquear la replicación del virus; más tarde se demostró que inhibirían la fusión y el desprendimiento de la cápside. Con ayuda de la información genómica se buscan también inhibidores de la fusión para el virus respiratorio sincitial (agente de complicaciones pulmonares en niños prematuros), los de la hepatitis B y C, y VIH.

Muchos resfriados podrán pronto controlarse con otro bloqueador de la entrada, el pleconaril. Las comparaciones genómicas y estructurales han demostrado que muchas cepas comparten cierto bolsillo de la superficie de los rinovirus (responsables de la mayoría de los resfriados). El pleconaril se acopla a este bolsillo e inhibe la eliminación de la cápside vírica. Por lo que parece, el fármaco en cuestión actúa además contra los enterovirus, que causan diarrea, meningitis, conjuntivitis y encefalitis.



LA ESTRUCTURA DE LA PROTEASA DEL VIH (*cintas azules y verdes*) muestra su unión con lopinavir, parte de Kaletra, un fármaco antisida. Estos inhibidores de la proteasa evitan que el virus forme nuevas proteínas por escisión de una cadena que las contiene.

Copia y replicación

Numerosos antivíricos comercializados, y otros en estudio, operan en la fase ulterior al desprendimiento de la cápside, cuando el genoma vírico, sea de ADN o de ARN, se libera para copiar y dirigir la síntesis de proteínas víricas. Varios de los agentes que inhiben la replicación del genoma remedan a nucleósidos o nucleótidos. Las enzimas que copian el ADN o el ARN incorporan tales análogos en las hebras nacientes. Y son precisamente esas imitaciones las que impiden que las enzimas añadan nuevos bloques a la cadena; se aborta así la replicación del virus.

El aciclovir, el primer fármaco antivírico de probada eficacia y escasa toxicidad, constituye un análogo nucleosídico. Se descubrió tras un muestreo de compuestos seleccionados por su capacidad obstructiva de la replicación del virus del herpes simple. Se prescribe para el herpes genital; moléculas con él emparentadas se indican contra otras infecciones herpéticas, como el zoster causado por la varicela y la inflamación de la retina que produce el citomegalovirus.

El primer fármaco aprobado para su uso contra el VIH, la zidovudina (AZT), es otro análogo nucleosídico. Ideado como anticancerígeno, pronto se advirtió que obstruía la actividad de la transcriptasa inversa, una enzima que el VIH utiliza para copiar en ADN su genoma de ARN. Si este paso se realiza con éxito, otras enzimas del VIH unen el ADN en los cromosomas de la célula invadida, y allí el ADN integrado dirigirá la reproducción del virus.

El AZT puede acarrear efectos secundarios graves; anemia, por ejemplo. No obstante, la investigación sobre la secuencia del gen de la enzima de la transcriptasa inversa ha permitido sintetizar otros análogos nucleosídicos menos tóxicos. De éstos, la lamivudina ha recibido aprobación oficial para la hepatitis B, que aplica la transcriptasa inversa para convertir copias de ARN obtenidas del ADN genómico en nuevo ADN. Tras rigurosos análisis de la transcriptasa inversa del VIH se han logrado versiones mejoradas de una clase de inhibidores de dicha enzima que no mimetizan a los nucleósidos.

La genómica ha puesto al descubierto nuevas posibilidades, objetivos potenciales contra los cuales intervenir para suspender la replicación del VIH. Citemos la ARNasa H, una parte de la transcriptasa inversa que separa, del ARN, el ADN recién acuñado; también, el centro activo de la integrasa, una enzima que agrega el ADN sintetizado al ADN cromosómico de la célula infectada. En voluntarios infectados por el VIH se está sometiendo a prueba un inhibidor de la integrasa.

Inhibición de la síntesis de proteínas

Todos los virus tienen, en algún momento de su ciclo biológico, que transcribir genes en hileras de ARN mensajero. La célula huésped las "traduce" en síntesis de proteínas. Se trabaja en diversos fármacos destinados a entorpecer la etapa de la transcripción: se pretende que eviten la unión entre los factores de transcripción y ADN vírico, de la que resulta la producción de ARN mensajero.

La genómica ha contribuido a identificar los objetivos de muchos de estos agentes. Además, ha promovido la confección de un nuevo tipo de fármaco: la molécula antisentido. Si la genómica demuestra

Fármacos antivíricos

Presentamos algunos virus importantes desde el punto de vista médico cuyos genomas se han secuenciado. El grupo dirigido por Frederick Sanger, de la Universidad de Cambridge, determinó la secuencia de ADN del primer genoma vírico —de un virus que infecta bacterias— en 1977.

VIRUS	ENFERMEDAD	AÑO DE SU SECUEN-CIACION
Poliovirus humano	Poliomielitis	1981
Virus de la gripe A	Gripe	1981
Virus de la hepatitis B	Hepatitis B	1984
Rinovirus humano tipo 14	Resfriado común	1984
VIH-1	Sida	1985
Papilomavirus humano tipo 16	Cáncer del cuello de útero	1985
Virus del dengue tipo 1	Dengue	1987
Virus de la hepatitis A	Hepatitis A	1987
Virus del herpes simple tipo 1	Herpes labiales	1988
Virus de la hepatitis C	Hepatitis C	1990
Citomegalovirus	Infecciones retinianas en pacientes de sida	1991
Virus de la varicela	Varicela	1992
Virus de Ebola	Fiebre hemorrágica de Ebola	1993
Virus respiratorio sincitial	Infecciones respiratorias de la infancia	1996
Virus paragripal 3	Infecciones respiratorias de la infancia	1998

que se requiere una determinada proteína para un virus, los farmacólogos pueden detener su síntesis recubriendo parte del molde de ARN con un fragmento de ADN diseñado a propósito y que se una firmemente a la secuencia de ARN seleccionada. Se dispensa ya un medicamento antisentido, el fomivirsen, para tratar las infecciones oculares producidas por el citomegalovirus en sidosos. Y hay en vías de desarrollo agentes antisentido dirigidos contra otras enfermedades víricas; uno de ellos bloquea la producción de la proteína Tat del VIH, que éste necesita para la transcripción de otros genes del virus.

Se parte del genoma vírico para identificar los puntos del ARN por donde las ribozimas puedan cortar. (Las ribozimas son formas enzimáticas de ARN.) Está en fase de prueba una ribozima en pacientes con hepatitis C; y, menos avanzados, estudios de ribozimas contra el VIH. Algunos de estos proyectos recurren a la terapia génica, en virtud de la cual se introducen genes especialmente diseñados en células que luego producirán las ribozimas. Otros tipos de terapia génica en relación con el VIH van encaminados a la producción de anticuerpos que buscan objetivos en las células infectadas, así como proteínas que se encadenan a secuencias génicas del virus en el interior celular.

Dentro de la célula algunos virus producen una cadena proteica que debe seccionarse para obtener proteínas funcionales. El VIH es uno de estos virus; una proteasa, la enzima que lleva a cabo esos cortes. Cuando en el curso de la investigación sobre el VIH se advirtió la presencia de esta actividad, los farmacólogos sumaron la proteasa a sus objetivos potenciales. Así, a finales de los años noventa aparecieron los primeros inhibidores potentes de la proteasa gracias a la ayuda de un estudio estructural exhaustivo por ordenador. Aunque los inhibidores disponibles pueden causar efectos secundarios perturbadores (acumulación de grasa en zonas indebidas), prolongan la salud general y la vida en muchos enfermos, si se toman en combinación con otros fármacos antivíricos contra el VIH. Una nueva generación de inhibidores de la proteasa está en marcha.

Bloqueo de la migración vírica

Aun cuando genomas y proteínas víricos se reproduzcan en el interior celular, carecerán de eficacia patógena mientras no formen nuevas partículas víricas, dotadas de potencia suficiente para escapar de la célula y emigrar hacia otras. El zanamivir y el oseltamivir, indicados contra la gripe, intervienen en esa fase. Desde hace tiempo se sabe que la neuraminidasa, molécula que aparece en la superficie de los dos tipos principales de gripe (A y B), facilita la huida de las partículas víricas de las células que las producen. Por comparación genómica se descubrió la similaridad del sitio activo de la neuraminidasa entre las diversas cepas gripales; por investigación estructural se llegó a la creación de fármacos eficaces contra dicho centro. Los demás medicamentos antigripales actúan contra el tipo A.

Reforzando la respuesta inmunitaria del paciente se evita también la migración celular de los virus. Unas respuestas son generales; ocurre tal cuando los fármacos frenan la propagación de distintas clases de invasores, en vez de concentrarse sobre un patógeno determinado. Los interferones, por ejemplo, que participan en esa batalla inmunitaria, inhiben la síntesis proteica y otros aspectos de la replicación vírica en las células infectadas. En concreto, el interferón alfa constituye un elemento importante de la terapia contra las hepatitis B y C. (En el caso de la hepatitis C se indica junto con ribavirina, un fármaco más antiguo.) Se investigan otros interferones.

Entre las respuestas inmunitarias específicas mencionaremos la producción de anticuerpos estándar, que reconocen fragmentos de una proteína de la superficie del virus invasor, se enlazan con la proteína y señalizan el virus para su ulterior destrucción por otros componentes del sistema inmunitario. En cuanto se dispone de la secuencia génica que cifra la proteína de superficie del virus, pueden crearse anticuerpos puros, monoclonales, contra determinadas regiones del polipéptido en cuestión. Se expende ya en botica un anticuerpo monoclonal para prevenir el virus sincitial respiratorio en niños expuestos a la in-

fección; se está ensayando otro en pacientes que sufren hepatitis B.

A través de la comparación entre genomas víricos y humanos se ha sugerido una nueva estrategia antivírica. Numerosos virus fabrican proteínas que parecen moléculas implicadas en la respuesta inmunitaria. Algunas de tales versiones víricas desarman las defensas y salvan de la destrucción al virus. Los fármacos dirigidos contra esas proteínas miméticas que facilitan la huida podrían restablecer la integridad de las respuestas inmunitarias y acelerar la recuperación del organismo que sufre infecciones víricas. Se están investigando posibles agentes sanadores.

Virus resistentes

La búsqueda de fármacos antivíricos se ha convertido en una guerra sin cuartel. Los farmacólogos han de enfrentarse con la posibilidad de que los virus desarrollen resistencia o insensibilidad a muchos de los medicamentos, especialmente cuando se administran durante períodos prolongados, como ocurre en el sida y en bastantes casos de hepatitis B y C, enfermedades crónicas. Cada medicina prescrita hoy contra el VIH encuentra alguna cepa resistente; a menudo esa misma cepa es resistente a otros fármacos. Tal resistencia surge de la tendencia de los virus —en particular de los virus ARN, sobre todo el VIH— a mutar muy deprisa. Si una mutación capacita a la cepa para vencer algún obstáculo que impide su reproducción (un fármaco, por ejemplo), esa variante vírica prosperará pese a la barrera interpuesta.

Para mantener a raya la resistencia hasta que se encuentren vacunas eficaces, habrá que idear nuevos fármacos. Cuando surjan mutantes resistentes a un medicamento, la lectura del texto genético puede revelar el lugar del genoma del virus donde se ha producido la mutación y sugerir el modo en que esa mutación socava la interacción entre la proteína del virus afectada y el fármaco. A través de tal información el farmacólogo proseguirá la búsqueda de nuevas estructuras medicamentosas u otros medios encaminados a mantener la eficacia de la medicina a pesar de la mutación.

Se investiga en fármacos nuevos basados en la capacidad para combatir cepas resistentes a otros medicamentos. Recientemente, los laboratorios DuPont optaron por el DPC 083, un nuevo inhibidor, no nucleosídico, de la transcriptasa inversa, para el desarrollo de fármacos encaminados a vencer la resistencia a otros inhibidores. Los investigadores examinaron las mutaciones del gen de la transcriptasa inversa que causaba la resistencia. Después estudiaron modelos con el ordenador para crear compuestos potenciales que inhibieran la enzima transcriptasa inversa, pese a las mutaciones. Recurrieron luego a la ingeniería genética para producir virus que sintetizaran las enzimas mutadas, y seleccionaron el compuesto más adecuado para limitar la reproducción de aquellos virus. El fármaco se encuentra ahora en fase de prueba y evaluación en enfermos de sida.

Quizá tardemos algún tiempo antes de que todas las infecciones víricas graves puedan prevenirse con vacunas o tratarse eficazmente con un fármaco. Pero la secuenciación reciente del genoma humano, aunque provisional, ha de permitirnos descubrir un grupo nuevo de proteínas que estimulen la producción de anticuerpos antivíricos o que potencien otras partes del sistema inmunitario contra los virus.

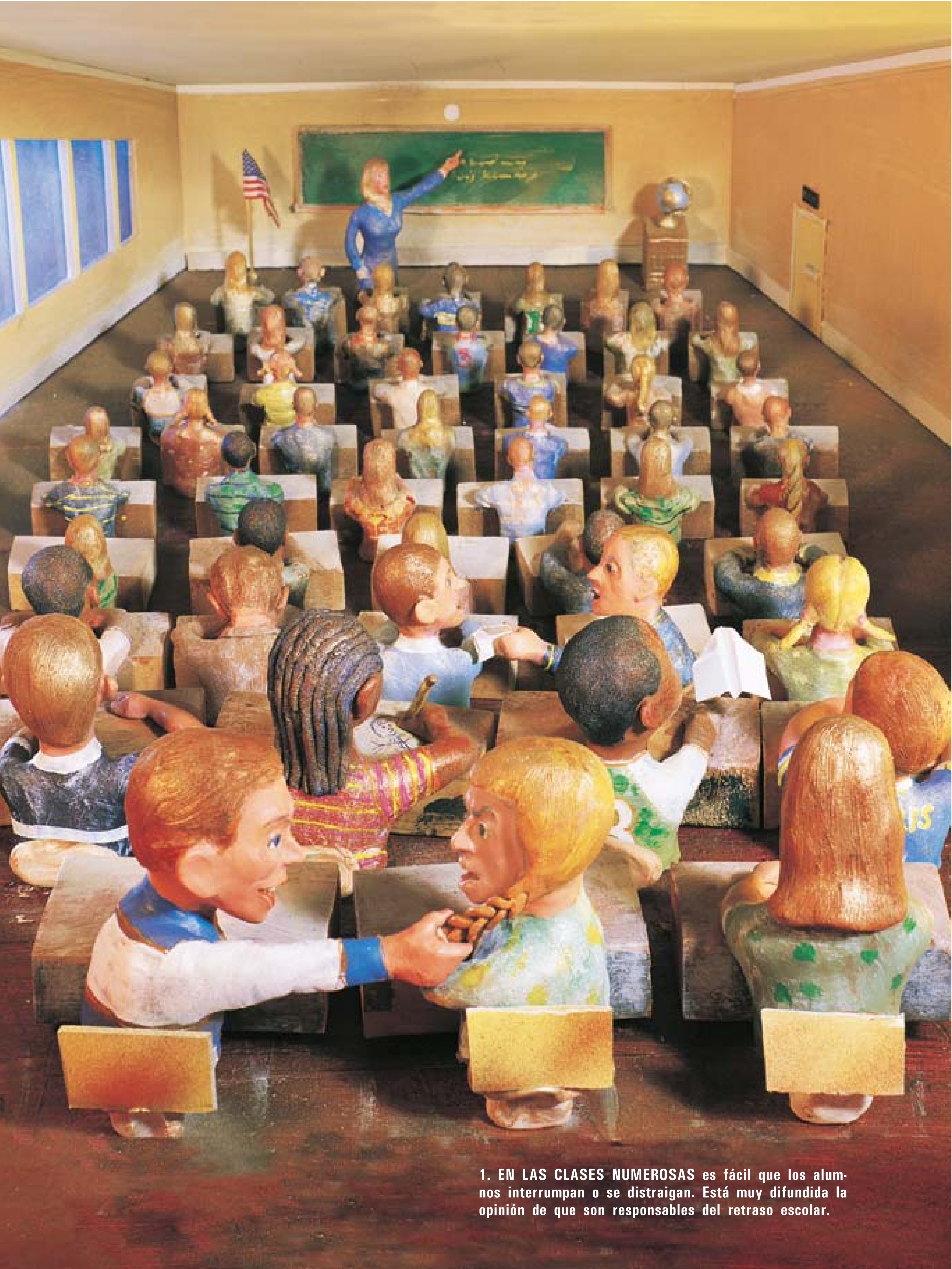
Bibliografía complementaria

STRATEGIES FOR ANTIVIRAL DRUG DISCOVERY. Philip S. Jones en *Antiviral Chemistry and Chemotherapy*, vol. 9, n.º 4, págs. 283-302; julio de 1998.

NEW TECHNOLOGIES FOR MAKING VACCINES. Ronald W. Ellis en *Vaccine*, vol. 17, n.º 13-14, págs. 1596-1604; 26 de marzo de 1999.

PROTEIN DESIGN OF AN HIV-1 ENTRY INHIBITOR. Michael J. Root, Michael S. Kay y Peter S. Kim en *Science*, vol. 291, n.º 5505, págs. 884-888; 2 de febrero de 2001.

ANTIVIRAL CHEMOTHERAPY: GENERAL OVERVIEW. Jack M. Bernstein, Wright State University School of Medicine, Division of Infectious Diseases, 2000.



1. EN LAS CLASES NUMEROSAS es fácil que los alumnos interrumpan o se distraigan. Está muy difundida la opinión de que son responsables del retraso escolar.

La importancia del número de alumnos

La reducción del número de alumnos por clase es onerosa. ¿Justifican el gasto los resultados?

Ronald G. Ehrenberg, Dominic J. Brewer, Adam Gamoran y J. Douglas Willms

La educación constituye la vía más segura para lograr una vida mejor en todos los aspectos que realmente importan: intelectual, social, económico e incluso en el plano físico. Es una de las columnas que sostienen la sociedad moderna y objeto de debates sin cuento, a menudo apasionados, sobre la forma de mejorarla.

Estos debates se acaloraron en Estados Unidos cuando se supo que los alumnos de secundaria obtienen resultados pobres en comparación con muchos de sus homólogos europeos o asiáticos. La noticia coincidió con la preocupación que suscitan los centros de enseñanza sitos en áreas urbanas o en vecindarios periféricos de baja renta *per cápita*, de los cuales son demasiados los que languidecen en rendimientos muy inferiores a los de las escuelas de comunidades residenciales de clase media o media-alta.

De todas las ideas para mejorar la educación, pocas tan sencillas o atractivas como la reducción del número de alumnos por docente. A diferencia de otras medidas propuestas para la reforma, como las basadas en evaluación del profesorado, en las llamadas escuelas *chárter* o en los cheques escolares, la idea de reducir el número de alumnos por grupo rara vez suscita grandes voces en contrario, ni es tenida por augurio de cambios estructurales. La evaluación de los docentes suscita, por lo general, las iras de sus sindicatos. Las escuelas *chárter* o los cheques escolares entrañan asignaciones económicas cuyo destino final es otra escuela; la administración educativa y algunos legisladores se oponen a tales propuestas porque su financiación se hace, de ordinario, a costa de los presupuestos de escuelas locales que tratan de salir a flote.

La reducción del número de alumnos por grupo resulta atractiva por su simplicidad y por la inexistencia de oposición vigorosa. En los Estados Unidos se ha convertido de un asunto primordialmente académico en un imponente problema político. Más de 20 estados, amén del gobierno federal, han adoptado ya políticas tendentes a tal reducción, y en los últimos años han invertido o comprometido en ella miles de millones de dólares. El clamor en petición de clases menos numerosas está resonando también en Canadá, Australia, en el Reino Unido e incluso en Japón, cuyos resultados en enseñanza secundaria son la envidia de la mayoría de otros países desarrollados.

La disminución del número de alumnos tiene un inconveniente obvio: no es barata. Exige más docentes, y posiblemente, más aulas, con su correspondiente equipamiento. El coste de otros planes,

Los autores

RONALD G. EHRENBERG, DOMINIC J. BREWER, ADAM GAMORAN y J. DOUGLAS WILLMS son coautores de un trabajo de revisión de los estudios que relacionan el número de alumnos por grupo y el rendimiento escolar. Ehrenberg es catedrático de relaciones laborales e industriales y economía en la Universidad de Cornell; Brewer, especialista en los aspectos económicos de la enseñanza, dirige Rand Education, que analiza los programas y políticas sobre aspectos educativos; Gamoran, antiguo becario Fulbright, enseña sociología y política educativa en la Universidad de Wisconsin en Madison; Willms es profesor y director del Instituto Canadiense de Investigación de Política Social en la Universidad de Nueva Brunswick.

como la evaluación del profesorado o la elevación de sus salarios para atraer a la docencia a candidatos mejor preparados, resulta diminuto en comparación con éste. El estado de California, por ejemplo, ha estado dedicando anualmente más de 1500 millones de dólares durante los últimos ejercicios, con el fin de rebajar el número de alumnos por clase, hasta un máximo de 20 en los niveles de Preescolar hasta Tercer Grado.

Por otra parte, si la reducción de alumnos fuese realmente eficaz, el fruto económico a largo plazo podría ser enorme. Los beneficios llegarían no sólo de una fuerza laboral mejor preparada, sino también por otras causas, como la reducción en gastos médicos o en bajas laborales de una población más sana y mejor informada.

La ola de interés por la reducción del "módulo escolar" ha sido acicate para nuevos análisis del estudio más amplio y concluyente efectuado hasta la fecha, que tuvo lugar en Tennessee durante la segunda mitad del decenio de los ochenta. Al mismo tiempo, están fluyendo nuevos datos tomados de otras iniciativas, entre ellas, el programa de California y, a menor escala, el de Wisconsin. Estos resultados y análisis están por fin ofreciendo respuestas, siquiera provisionales, a las preguntas previas a toda acción política educativa y económicamente sensata: ¿Mejora realmente el rendimiento escolar al reducir el número de alumnos por aula? De ser así, ¿en qué cursos o niveles se obtiene el máximo beneficio? ¿Qué clases de alumnos resultan más beneficiadas? Y lo más importante de todo: ¿Cuánto es el beneficio?

¿Por qué grupos reducidos de alumnos?

Los educadores ofrecen múltiples explicaciones de por qué sería de esperar que mejorase el rendimiento académico al ser los grupos menos numerosos, pero, a menudo, sus ideas son de carácter anecdótico. Un menor número de alumnos por clase parece traducirse en menos ruido y menos comportamientos perturbadores, lo que proporciona al docente no sólo más tiempo para trabajar en clase, sino también mayor libertad para que los alumnos se dediquen a actividades creativas, por ejemplo, distribuyéndolos en grupos para realizar proyectos específicos. Y al ser menos los alumnos, es más fácil que el docente preste atención personalizada a los alumnos con dificultades.

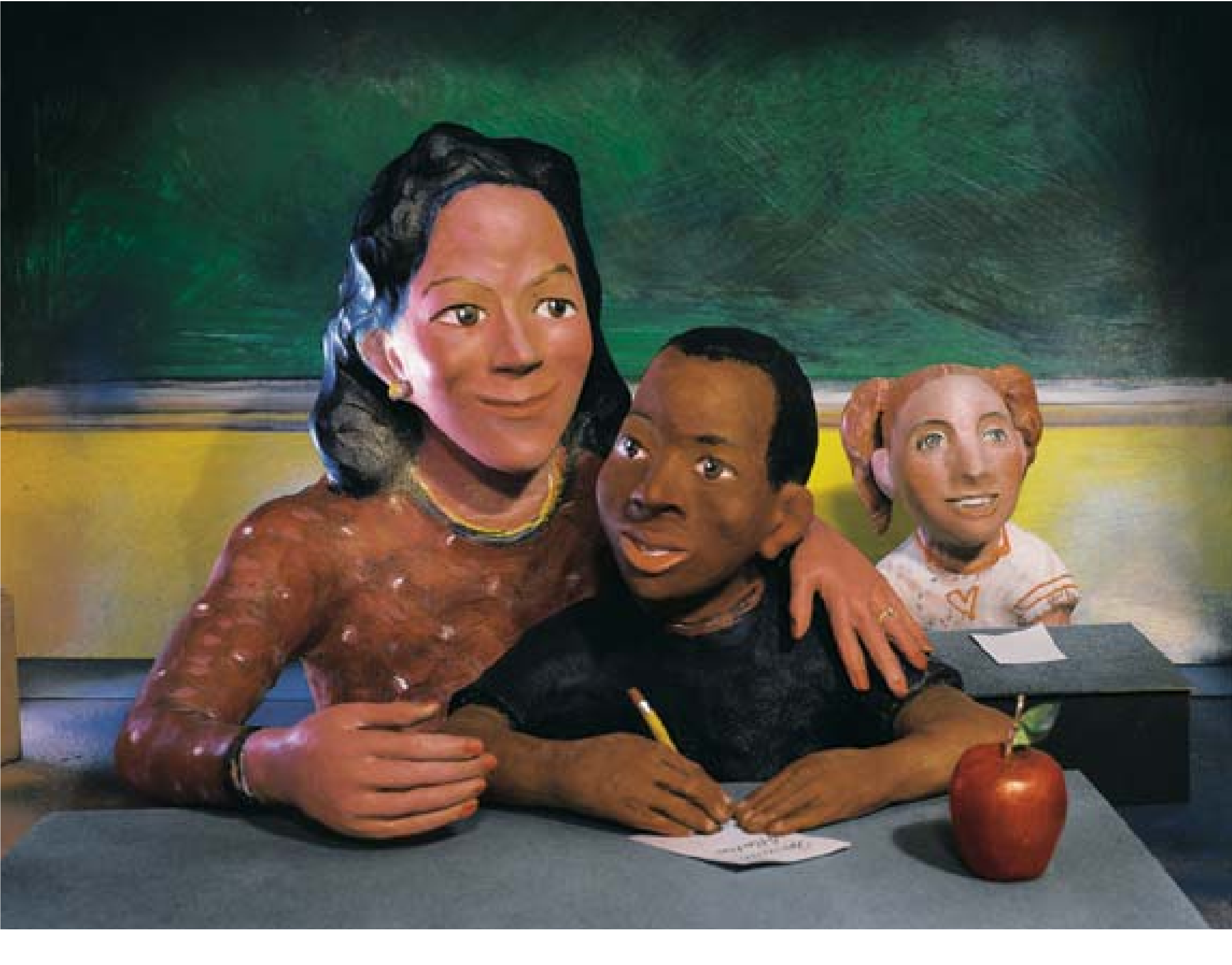
Asimismo, en un grupo reducido el profesor tiene mayores posibilidades de suscitar debates, de asignar más tareas escritas y corregir los trabajos escritos de los alumnos. Dicho de otro modo, muchas de las ventajas que puedan ofrecer los grupos reducidos dependen de que los docentes adapten sus métodos para aprovechar esa reducción. Por último, algunos analistas opinan que, con grupos menores, es más probable que los alumnos de los primeros niveles desarrollen buenos hábitos de estudio, una mejor opinión de sí mismos y, posiblemente, otros rasgos cognitivos beneficiosos, que podrían muy bien perdurar durante años, incluso después de que los alumnos se hayan integrado en clases de tamaño normal. Sin embargo, todas estas ideas son en gran medida de carácter especulativo, porque apenas se han realizado investigaciones dirigidas a determinar con precisión los modos en que los grupos reducidos podrían beneficiar a los niños.

Una de las vías por las que los investigadores han tratado de analizar los efectos dimanantes del número de alumnos por grupo es la revisión de los datos existentes, como los registros que conserva el Departamento de Educación de EE.UU. Estos registros permiten ver que, entre 1969 y 1997, el número medio de alumnos por docente en las escuelas elementales estadounidenses, sin distinción entre públicas y privadas, descendió desde 25,1 hasta 18,3, una reducción de más del 27 por ciento. También decayó en las escuelas secundarias desde 19,7 hasta 14,0.

¿Qué cambios experimentó el rendimiento académico mientras estaban produciéndose tan abruptos descensos en la *ratio* alumnos/profesor? No gran cosa. Los datos tomados de la Evaluación Nacional de Progreso en Educación (una serie de pruebas que constituyen el único indicador de los conocimientos de los alumnos en lectura, matemáticas, ciencias y otras materias, que se efectúa en todos los EE.UU.) no parecen indicar mejorías importantes ni sistemáticas. En ciertos apartados de edades y de materias, caso de los alumnos de 17 años y en ciencias, los datos in-

Resumen/Número de alumnos por clase

- En Estados Unidos, Australia, Canadá y otros países, los órganos legislativos han dedicado miles de millones de dólares a reducir el número de alumnos por clase en las escuelas primarias.
- Han sido centenares los estudios que han examinado si el rendimiento académico mejora realmente al reducir el número de alumnos. Pero muy pocos han llegado a resultados incontrovertibles.
- La excepción ha sido el Proyecto STAR. De acuerdo con el mismo, las clases reducidas resultan especialmente favorables para alumnos procedentes de minorías en los niveles escolares iniciales.



dican que el rendimiento disminuyó ligeramente.

2. LA ATENCION INDIVIDUALIZADA debería ser mayor al disminuir el número de alumnos. Los investigadores sospechan que los beneficios de las clases poco numerosas dimanan de esta mayor atención, del menor número de perturbaciones y de la posibilidad de que los maestros apliquen métodos didácticos que no suelen ser eficaces en grupos grandes, como los debates o la asignación de tareas escritas.

Lo que muestran los datos

¿Demuestran estos hallazgos que el número de alumnos por grupo es irrelevante? No necesariamente. Por diversas razones, la mayor parte de los investigadores (nosotros entre ellos) prestan poca atención a esas cifras. Las escuelas, por ejemplo, se esfuerzan en lograr bastante más que calificaciones altas; por lo general, procuran también mantener bajas las tasas de abandono. En efecto, la tasa de abandonos en el intervalo de edades de 16 a 24 años cayó en dicho período del 15 al 11 por ciento. Dado que los abandonos suelen afectar al extremo inferior de la distribución de calificaciones, es de esperar que el descenso en la tasa de abandonos tire hacia abajo de las calificaciones medias en los grados superiores.

Otro de los motivos para no tener muy en cuenta tales datos concierne directamente a la esencia de las dificultades de este campo de estudio: resulta difícil aislar los efectos del número de alumnos de la miríada de otros elementos que influyen en el rendimiento escolar. Lo ideal sería que todos los alumnos procedieran de familias de economías holgadas, cuyos padres fuesen angloparlantes y poseyeran una educación superior, amén de participar activamente en la educación y escolarización de sus hijos. Los docentes, por su parte, deberían ser todos personas dotadas de gran creatividad e imaginación, impuestos en sus materias. Las escuelas, obviamente, deberían ser lugares bien dotados, con bibliotecas, ordenadores y otros recursos.

La realidad estadounidense es que en 1995 tan sólo el 68 por ciento de los escolares procedía de familias biparentales, frente al 85 por ciento de 1970. La fracción de niños que tienen dificultades para expresarse en inglés se

elevó desde el 2,9 por ciento de 1979 hasta el 5,1 por ciento de 1995. Y el porcentaje de niños que viven en la pobreza se incrementó también desde el 14,9 de 1970 hasta el 20,2 por ciento en 1995. Hay, por supuesto, buenas noticias: en ese mismo período la mediana del nivel de educación de los padres se elevó un poquito, y lo mismo el de los docentes, cuya media de años de experiencia también subió.

El saldo final es que los cambios demográficos hacen muy difícil depurar los efectos de la disminución de las *ratio* alumno/profesor. Experimentos bien diseñados tratan de neutralizar la influencia de estos otros factores, asignando aleatoriamente alumnos y profesores a grupos de distintos tamaños y tomando muestras grandes. A lo largo de los últimos 35 años, han sido centenares los estudios y análisis de los datos existentes (como las estadísticas del Departamento de Educación) que se han centrado en el número de alumnos por clase. La mayoría encontraron indicios de que una clase más reducida es beneficiosa para los estudiantes, particularmente en los cursos iniciales, y, sobre todo, para los alumnos con riesgo de quedar rezagados. Lamentablemente, el diseño estadístico de muchos de estos estudios solía ser deficiente. Las asignaciones de alumnos y profesores rara vez eran aleatorias; cierto número de estudios fueron de duración demasiado breve, o la muestra, demasiado pequeña; muy pocos tuvieron una evaluación independiente.

La excepción a destacar fue el estudio de Tennessee antes mencionado. Frederick Mosteller, estadístico de la Universidad de Harvard, lo ha calificado de "uno de los mayores experimentos en educación de la historia de los Estados Unidos". El estudio, más conocido por Proyecto STAR (sigla de Student-Teacher Achievement Ratio, ratio de resultados alumno-profesor), fue un programa de demostración con patrocinio estatal, con un coste de 12 millones de dólares. Los niños que llegaban a preescolar eran asignados aleatoriamente a uno de tres tipos de grupos: un grupo pequeño, de 13 a 17 alumnos, un grupo de tamaño normal, de 22 a 26, o un grupo de tamaño normal que contaba con un docente y un auxiliar con dedicación plena.

Los niños permanecían en la categoría a la que habían sido adscritos hasta el final del tercer grado (a una edad de 9-10 años), tras lo cual ingresaban en una clase normal de cuarto grado. Para asegurarse de que la calidad de la enseñanza no fuera distinta, los docentes fueron asignados al azar a grupos reducidos y normales. Los profesores que recibieron formación especial para trabajar con grupos reducidos eran pocos; tampoco se introdujeron materiales curriculares nuevos.

Durante el primer año participaron unas 70 escuelas y 46 distritos, siendo asignados 1900 niños a 128 grupos reducidos, 2300 estudiantes a 101 grupos ordinarios y 2200 a 99 grupos de tamaño normal con auxiliar. Cuatro años después, al final del estudio, la plantilla total de alumnos participantes se había incrementado desde 6400 hasta 12.000.

STAR

Tras la conclusión del estudio, en 1989, los investigadores efectuaron docenas de análisis de los datos. Entre los escasos puntos en que estuvieron de acuerdo

Adaptabilidad del docente

La idea subyacente bajo la propuesta de grupos reducidos es que en ellos son mínimas las interrupciones. Conceden también libertad al docente para la atención individual y para una metodología menos rutinaria; por ejemplo, para hacer que los estudiantes trabajen en pequeños grupos. Así pues, cuando no existen problemas importantes de disciplina, sería de esperar que las posibles ganancias obtenidas al reducir el número de alumnos sean consecuencia de que la maestra recurra a métodos que saquen provecho del menor número de alumnos.

Pero repetidos estudios han encontrado que los docentes raramente ajustan su estilo de enseñanza al tamaño de la clase. De hecho, los datos obtenidos en el proyecto STAR de Tennessee, el mejor de los estudios realizados hasta la fecha sobre clases reducidas, hacen ver lo difícil que es que los docentes cambien sus métodos: ni siquiera un curso veraniego de reciclaje profesional indujo a los participantes a modificar la forma de trabajar con grupos pequeños. Parece, además, que los educadores dedican la misma cantidad total de tiempo a la instrucción individual en las clases grandes que en las pequeñas. Cuando el número de alumnos es menor, cada uno recibe una mayor porción de ese tiempo, pero el aumento apenas es suficiente para explicar diferencias significativas en el rendimiento escolar.

Si los docentes trabajan más o menos de igual modo en los grupos grandes y en los pequeños, ¿a qué se deben los beneficios de las clases reducidas que se observan en estudios experimentales, como STAR? Una explicación verosímil es que los maestros que han instaurado de forma natural métodos más adecuados a grupos reducidos —aquellos a quienes les gustaba dividir a la clase en pequeños grupos, que desarrollan relaciones personales con los alumnos y que cargan el acento en proyectos llevados a la práctica por los alumnos— obtienen muy buenos resultados cuando les son adscritos grupos reducidos. Sus buenos resultados elevan el promedio, al que probablemente contribuye también el menor número de problemas de disciplina.

Esta interpretación es coherente con los hallazgos de que las ganancias más sustanciales en rendimiento escolar se registran en los primeros estadios del nivel elemental; no se acumulan a partir del primero o segundo grados. Son los docentes de preescolar y de primer grado quienes más se valen del trabajo en pequeños grupos, en manualidades y en la relación personal con los niños.

Para confirmar tales supuestos, los investigadores tendrían que estudiar las relaciones entre número de alumnos por clase, las actividades de instrucción y los resultados académicos correspondientes a los distintos cursos. Es sorprendente que nadie lo haya abordado, habida cuenta de lo muy útil que tal información le sería a la administración educativa para decidir dónde y cómo

ESTUDIOS DE REFERENCIA SOBRE EL NUMERO DE ALUMNOS

Proyecto	Estado	Fechas	Tipo de programa	Alumnos participantes	Costo aproximado	Alumnos por clase	Hallazgos principales
STAR	Tennessee	1985 a 1989	Experimento demostrativo	Aproximadamente, 10.000	12 millones de dólares	13 a 17	Mejora significativa en el rendimiento de 0,2 de la desviación típica; ganancias mayores en alumnos de minorías
Reducción del número de alumnos	California	1996 hasta el presente	Aplicado en todo el estado	1,8 millones	5000 millones de dólares	Menos de 20	Pequeña ganancia en el rendimiento, entre 0,05 y 0,1 de la desviación típica; no hay ganacias mayores en las minorías
SAGE	Wisconsin	1996 hasta el presente	Proyecto piloto	64.000	103 millones de dólares	12 a 15	Ventaja significativa en el rendimiento de 0,2 de la desviación típica; ganancias mayores en alumnos de minorías

los analistas uno fue que los auxiliares no tenían influencia. Las investigaciones discrepan sobre el tiempo que han de permanecer los alumnos en grupos reducidos para obtener beneficios, sobre la magnitud de tal beneficio o sobre cuándo resulta apreciable. Con otras palabras, los resultados recopilados no han fructificado en consenso sobre las cuestiones que importan a los legisladores.

Jeremy Finn, de la Universidad de Nueva York en Buffalo, y Charles M. Achilles, de la Oriental de Michigan, encontraron en su revisión "toda una serie de beneficios de las clases reducidas". Finn calculó que los alumnos de grupos reducidos superaban a sus homólogos de los grupos ordinarios en la quinta parte de una desviación estándar, y que este considerable avance en su rendimiento solía manifestarse ya en el primer grado. Mejor todavía: tal ventaja parecía persistir en los grados elementales superiores, incluso después de que los alumnos hubieran regresado a grupos más numerosos.

¿Cuánta diferencia supone un quinto de una desviación típica? Imagine el lector a dos niños de preescolar, cada uno tan "promedio" como sea posible, estadísticamente hablando. Ambos se hallan en el percentil 50, lo que significa que la mitad de los demás alumnos tiene rendimientos superiores al de estos dos, y que la otra mitad los tiene inferiores. Pongamos a uno de ellos en un grupo reducido y dejemos al otro en un grupo normal. Al cabo de un año, el alumno del grupo reducido estará en el percentil 58 o, si se quiere, este niño está obteniendo resultados mejores que casi el 60 por ciento de sus iguales, mientras que el otro niño seguirá superando sólo al 50 por ciento.

Finn y Achilles encontraron también que el efecto era más acusado en el caso de alumnos de minorías sociales, en un factor entre 2 y 3. Es decir, los niños negros o hispanoamericanos mejoraron entre dos y tres quintos de una desviación típica, un hallazgo importante para la política educativa, porque los niños de minorías étnicas puntúan en ciertas pruebas estandarizadas alrededor de una desviación típica menos que los niños no procedentes de tales minorías.

Varios analistas, en particular Eric Hanushek, del Instituto Hoover de la Universidad Stanford, critican al programa STAR y a algunas de las conclusiones clave alcanzadas por sus proponentes. Hanushek concede que los alumnos pueden obtener un beneficio inicial de su adscripción a grupos reducidos. Pero —opone— los datos de STAR no sirven para demostrar que las ganancias persisten durante años, una vez que el alumno ha regresado a grupos de tamaño normal. Si un niño sigue todavía progresando años después, resulta difícil saber cuánto de ese buen rendimiento es fruto de otros factores, como un hogar en el que reciba apoyo y le dé confianza.

Hanushek también está en desacuerdo con un análisis que indica que los beneficios que reportan los grupos pequeños son acumulativos; es decir, que los estudiantes que permanecen en grupos pequeños durante varios años amplifican curso tras curso su superior rendimiento con respecto a sus iguales de grupos más numerosos. Cuando estudió las ganancias de alumnos STAR que permanecieron durante cuatro años en grupos reducidos (desde su entrada en preescolar hasta salir de tercer grado), no encontró que las ganancias fueran mayores que las de los inscritos en preescolar.

Hanushek y otros han demostrado igualmente que, durante el estudio, demasiados niños fueron transferidos desde los grupos normales a los reducidos, probablemente porque la administración de la escuela cedió ante la presión de los padres. Y Hanushek asegura que STAR no realizó comprobaciones suficientes que aseguraran una buena aleatorización de las asignaciones de profesores y estudiantes. Sus objeciones son correctas, pero no minan la comprobación de un beneficio estadísticamente significativo al pertenecer a un grupo de 13 a 17 alumnos en lugar de a otro de, por ejemplo, 23 alumnos.

Dos planteamientos: California y Wisconsin

Los legisladores se enfrentan ahora al problema de acertar con una política educativa juiciosa, basada en interpretaciones prudentes de los resultados de STAR y

LA PARADOJA ASIATICA: Clases numerosas, altas calificaciones

Un estudio tras otro sitúa a los niños japoneses y a los de otros países asiáticos entre los mejores del mundo, sobre todo en ciertas pruebas estandarizadas de matemáticas y de ciencias. Mientras, los alumnos de secundaria de los EE.UU. han ido deslizándose hasta quedar por debajo de los de Grecia y Lituania en matemáticas superiores y en física.

Y sin embargo, en Asia, las clases son numerosas. Cuarenta alumnos por profesor es lo normal. En contraste, las clases elementales de los EE.UU. cuentan, según el Departamento de Educación de ese país, con 24 alumnos por término medio.

¿Por qué obtienen tan buenos resultados los estudiantes asiáticos en clases tan numerosas? Tomemos el caso de Japón, donde reina en las aulas una disciplina legendaria. Tal rigor no viene impuesto por profesores temibles, según Catherine Lewis, experta en el sistema educativo japonés e investigadora en el colegio universitario Mills. Antes bien, los estudiantes tienen a honra ser elegidos para explicar las lecciones, y se encargan por turno de llamar la atención de la clase, experimentando de primera mano las dificultades de apaciguar a un grupo revoltoso. Así, los maestros controlan la clase basándose en "la fuerza acumulada y general de la reflexión de cada uno, en lugar de recurrir a premios y castigos", explica Lewis.

También ocurre que los maestros y los estudiantes japoneses pasan mucho más tiempo juntos —el curso escolar dura unos 40 días más que en EE.UU.— y más tiempo estableciendo lazos mutuos, en festivales escolares y en excursiones y salidas al campo. Se hace un énfasis extraordinario en que la clase, el grupo y la escuela sean para los niños entidades con significado.

La eficacia japonesa está sustentada también por algo que no tiene: la diversidad étnica y lingüística. Finalmente, es mucho menos probable que se divorcien unos padres asiáticos que unos norteamericanos, y es mucho más probable que participen activamente en la educación de sus hijos.

Hay, desde luego, un aspecto menos favorable en el sistema asiático: las rígidas normas nacionales no favorecen la creatividad. Y en Japón, algunos niños se esfuerzan mucho en sobresalir debido, en parte, a un prematuro temor a suspender.

Dadas las profundas diferencias culturales, no está claro qué partes de la fórmula asiática podrían funcionar en Norteamérica. Pero la experiencia asiática sí hace ver lo que se puede lograr cuando la disciplina va de abajo arriba.

—Glenn Zorpette

de otros estudios. Desafortunadamente, el más importante de los programas públicos hasta el momento, el multimillonario plan de California, iniciado en 1996, destaca más como modelo de lo que *no* se debe hacer que como iniciativa digna de emulación. En dicho estado se pretende reducir el número de alumnos desde preescolar hasta el tercer grado, llevándolo desde un máximo de 33 hasta un máximo de 20 tanto en los distritos pobres como en los acomodados, pese a la escasez de docentes cualificados, más aguda en las áreas de ingresos bajos. Esta metodología universal, políticamente conveniente quizás, en realidad parece que ha exacerbado la disparidad de los recursos de que disponen las escuelas públicas ricas y pobres de California.

Nada sorprendentemente, el programa suscitó una mayor demanda de maestros en casi todos los distritos de California. Los distritos de mayores recursos, que ofrecían mejores salarios, se hicieron con los docentes acreditados, buen número de ellos venidos de los distritos más pobres, distritos que estaban ya padeciendo dificultades para reclutar y conservar a buenos maestros. Estos distritos, en su mayoría urbanos, acabaron teniendo que arreglarse con personal poco experimentado y sin título. A mayores, los distritos urbanos, en crecimiento rápido, carecían de espacio donde construir nuevos centros, y algunos de ellos no pudieron rebajar el módulo hasta 20 alumnos, condición necesaria para solicitar financiación del estado de California.

La experiencia de California no ha llevado a conclusiones claras acerca de si el número de alumnos influye sobre el rendimiento escolar. No hubo aleatorización, ni existía inicialmente un sistema estatal de ensayos, ni se establecieron procedimientos de evaluación. Sin embargo, varios investigadores que han examinado los resultados de los primeros años han llegado a algunas conclusiones sobre los estudiantes de tercer grado, los únicos para los que se dispone de datos estatales de calificaciones. Los evaluadores descubrieron una superioridad muy pequeña, aunque estadísticamente significativa, en lectura, redacción y matemáticas en las clases reducidas a 20 alumnos o menos, con respecto a las clases de más de 20. En contraste con los hallazgos de STAR, el diminuto efecto no parecía variar para alumnos de distintas etnias o extracción social.

El estudio sobre garantías de aprovechamiento escolar, SAGE, realizado en Wisconsin, también comenzó en 1996 y abarcó un período de cinco años. Fue un estudio a pequeña escala —sólo se redujo en 14 escuelas el número de alumnos por clase— pero digno de atención, porque se centró en es-

cuelas donde al menos el 30 por ciento de los alumnos se hallaban por debajo del nivel de pobreza, a diferencia de la metodología californiana de "aspirina para todos". El estudio redujo el número medio de alumnos por clase desde preescolar hasta tercer grado de 22,42 a 13,47.

Los analistas han comparado hasta ahora a niños de primer grado de escuelas SAGE con alumnos de primer grado de un grupo de escuelas que atienden a poblaciones de similares ingresos familiares, nivel de estudios y composición racial. Los resultados de los dos primeros años son concordantes con los de STAR: los niños de primer grado de SAGE lograron mejoras estadísticamente significativas y considerablemente mayores que las calculadas en la iniciativa californiana.

¿Hay opciones más económicas?

Estudios como los STAR y SAGE han hecho difícil sostener que la reducción del número de alumnos por clase no repercute en los resultados. Por otra parte, la iniciativa de California ha hecho ver que la estrategia, aplicada con escasa reflexión previa y dudosa inteligencia, puede consumir miles de millones de dólares y, al menos a corto plazo, producir sólo beneficios minúsculos e incluso pérdidas.

Es necesario considerar otras opciones. El escaso trabajo que se ha realizado sobre la competencia de los docentes sugiere que los alumnos obtienen mejores resultados con profesores que tengan mayor destreza oratoria y, en el nivel secundario, más profundos conocimientos de su materia. Sorprendentemente, empero, ocurre a menudo que, en la selección de aspirantes a puestos docentes, los responsables de los distritos escolares no eligen a los candidatos de más sólida formación, sino que se inclinan por docentes que residan cerca de la escuela, graduados en centros universitarios de la localidad y diestros en llevar las clases.

En principio, al contratar personal, nada costaría hacer hincapié en su aptitud y dominio de su materia, si bien para lograr que se dedicasen a la docencia candidatos de elevada competencia sería necesario ofrecer salarios más altos. Nadie, hasta ahora, ha estudiado los costos relativos de atraer a un profesorado más capacitado frente a los que entraña la reducción del número de alumnos.

Tanto los legisladores como la administración necesitan una información mucho más fiable sobre los costos relativos de otras opciones, antes de que les sea posible tomar decisiones sensatas de política educativa. Esperemos que la obtengan antes de que dediquen más miles de millones a reducir el alumnado por clase, y antes de que millones de niños queden cubiertos por políticas universales, tal vez menos eficaces de lo que podrían ser.



3. CUARTOS TRASTEROS y otros locales pueden tener que convertirse en aulas para dar acomodo al mayor número de grupos que resulta de hacerlos más reducidos. En muchos distritos deberán construirse instalaciones nuevas, con altos costos. Los autores instan a la administración a considerar otros métodos de mejora de la enseñanza, como la contratación de profesores de gran destreza en la comunicación y excelente preparación en sus materias.

Bibliografía complementaria

STANDARDS FOR OUR SCHOOLS. Mark S. Tucker y Judy Codding. Jossey-Bass, 1998.

RESEARCH: SIZING UP SMALL CLASSES. Linda Jacobson en *Education Week on the Web*; 28 de febrero, 2001.

CLASS SIZE AND STUDENT ACHIEVEMENT. Ronald G. Ehrenberg, Dominic J. Brewer, Adam Gamoran y J. Douglas Willms en *Psychological Science in the Public Interest*, vol. 2, nº. 2, págs. 1-30 de mayo de 2001.

Daniel Grossman

RICHARD S. LINDZEN: la falacia del calentamiento global

Richard S. Lindzen —asesor del Senado, del Congreso y del gabinete presidencial— despunta con voz propia en el debate sobre el calentamiento global. Ha recibido diversos galardones, es miembro de la Academia Nacional de las Ciencias, ocupa la cátedra Alfred P. Sloan de meteorología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y no se arredra en poner en duda que las actividades humanas supongan una amenaza para el clima. Desafiante y ácido, Lindzen no soporta la superficialidad.

Fumando un cigarrillo tras otro como para poner más énfasis en su charla, me explica que nunca tuvo la intención de hablar abiertamente sobre el cambio climático. Todo comenzó en el tórrido verano de 1988. En las sesiones de una comisión parlamentaria, James E. Hansen, físico del Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA, hizo públicas sus opiniones: que los científicos sabían, "con un alto grado de confianza", que la actividad humana, por ejemplo el consumo de combustibles fósiles, estaba calentando el planeta. Lindzen se quedó indignado con las noticias que salieron en la prensa. "Pensaba que era importante —recuerda— dejar claro que la ciencia estaba en una etapa prematura y primitiva, que había poco espacio para el consenso y muchas razones para el escepticismo." Lo que creía que serían un par de meses en el candelero se convirtió en más de un decenio de escepticismo climático. "Sentía una obligación moral —rememora sobre esos primeros días—, aunque ahora es más una cuestión de la etiqueta que me han colocado."



Puede que sólo sea una etiqueta, pero Lindzen la lleva con brío. Su ataque en todos los frentes abarca los modelos informáticos, la física de la atmósfera y la investigación sobre el clima del pasado. Sus puntos de vista aparecen en una persistente sucesión de intervenciones ante comisiones parlamentarias, artículos de opinión en la prensa y conferencias divulgadoras. Hace meses dio unas lecciones introductorias sobre el cambio climático al gabinete del presidente Bush.

Resulta difícil desenmarañar la diferencia de posturas entre Lindzen y los demás científicos porque pone en tela de juicio gran parte de lo que éstos aceptan como probado. Cuestiona las conclusiones del informe que el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) publicó la primavera pasada, que muchos consideran el juicio científico definitivo sobre el cambio climático, y las de un reciente informe de la Academia Nacional de Ciencias que pasaba revista al trabajo de la mencionada comisión. Lindzen era el autor principal de un capítulo del informe del IPCC y uno de los autores del informe de la Academia Nacional de Ciencias. Pero según él, los científicos eximios del país (quienes, dice, están de acuerdo con él) prefieren no adentrarse en las arenas movedizas del cambio climático. Tom M. L. Wigley, un destacado experto en clima del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, replica que es "a todas luces incorrecto" que los científicos de valía guarden silencio. Los mejores del mundo, observa, han contribuido al informe del IPCC.

Lindzen está de acuerdo con el IPCC y la mayoría de los científicos que estudian el clima en que el planeta se ha calentado unos 0,5 grados Celsius durante los últimos 100 años aproximadamente. Concede que las actividades humanas han incrementado la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera en un



La nubosidad sobre los trópicos podría reducir el calentamiento global... o incrementarlo

30 por ciento. Pero disiente de los otros cuando se trata de vincular ambos hechos. No es que los seres humanos no produzcan ningún efecto sobre el clima. "Sí que lo producen", admite, aunque el influjo sobre el medio ambiente es el mismo que el de "una mariposa que bate sus alas".

El informe del IPCC asegura que "la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años" es de origen humano. Sostiene que las temperaturas de finales del siglo XX se dispararon por encima de lo que la Tierra haya experimentado en los últimos 1000 años. Michael E. Mann, geólogo de la Universidad de Virginia y uno de los autores del capítulo sobre el clima en la antigüedad del informe del IPCC, califica el pico de "cambio inexplicable con la variabilidad natural". Lindzen rechaza este análisis poniendo en tela de juicio el método para determinar las temperaturas de épocas pasadas. En lo concerniente a los primeros 600 años de los 1000 que hablamos, arguye, los investigadores únicamente se han servido de los anillos de los árboles para obtener la temperatura, y recogidos sólo en cuatro lugares diferentes. Afirma que el método utilizado para deducir la temperatura a partir de los anillos de los árboles presenta fallos irremediables.

Mann se encendió cuando le pregunté sobre las críticas de Lindzen, que calificó de "tonterías" y de "bazofia". Un examen detenido del informe mismo del IPCC muestra, por ejemplo, que los árboles no fueron la única fuente de datos: los testigos de hielo también ayudaron a reconstruir las temperaturas de los primeros 600 años. Y se tomaron muestras de árboles en 34 lugares independientes de una docena de regiones diferentes repartidas por todo el mundo, no en cuatro.

El clima de la antigüedad no es el único punto de divergencia. Lindzen también dice que no hay razones para preocuparse por el futuro. La clave de su optimismo reside en un parámetro llamado "sensibilidad climática". Esta variable representa el incremento esperado en la temperatura global si la cantidad de dióxido de carbono en el aire duplicara a la que había antes de la era industrial, un nivel del cual ya hemos alcanzado casi la tercera parte. Mientras que el IPCC y la Academia Nacional de Ciencias calculan que la sensibilidad climática está entre unos 1,5 y 4,5 grados C, Lindzen insiste en que se mueve en torno al orden de 0,4 grados.

El IPCC y la Academia Nacional de Ciencias obtuvieron valores más altos porque consideraron mecanismos de realimentación positivos. Así, una temperatura más elevada seguramente hará encoger el manto de hielo y nieve que recubre parte de la Tierra, lo cual a su vez ocasiona que el planeta sea menos reflectante, con lo que se acelera el calentamiento, a la vez que probablemente incremente la evaporación del agua. De hecho, el vapor de agua es el principal absorbente de calor en la atmósfera.

Pero Lindzen declaró el pasado mes de mayo ante la comisión de comercio del senado estadounidense que esas realimentaciones positivas "carecen de fundamento teórico y empírico". El mecanismo de realimentación imperante, aduce, es negativo y no positivo. Postula que el calentamiento en realidad vuelve más secas ciertas zonas de la atmósfera superior. Una menor cantidad de vapor de agua atenuaría a su vez el calentamiento. Hansen, del Goddard, dice que al invocar esta posibilidad Lindzen "ha contribuido notablemente a la discusión sobre el clima". Aunque se apresura a añadir: "Estoy convencido de que su crítica principal, a saber, que los modelos climáticos exageran la sensibilidad climática, es errónea."

En marzo, Lindzen publicó lo que califica de "quizás el más importante" de los artículos que ha escrito sobre realimentación negativa del vapor de agua. En él concluye que el calentamiento haría decrecer la cobertura de nubes en la zona tropical. La cobertura de nubes es un tema complicado. En función de factores que cambian de un momento a otro, las nubes pueden enfriar (reflejando la luz del Sol hacia el espacio) o calentar (atrapando el calor de la Tierra). En opinión de Lindzen, una reducción en la nubosidad tropical produciría un notable efecto global refrescante y actuaría como realimentación negativa estabilizante.

Pero tres equipos de investigación afirman que el artículo de Lindzen comete errores. En particular, su investigación está basada en datos recogidos de las imágenes de las nubes tropicales tomadas por satélite. Bruce A. Wielicki, del Centro de Investigación Langley de la NASA, cree que las imágenes no son representativas de toda la zona tropical. Utilizando datos de un satélite diferente, Wielicki y su grupo concluyen que el resultado final de que las nubes de los trópicos estén más calientes supondría un ligero calentamiento, y no un enfriamiento.

Mirando retrospectivamente el camino recorrido por la ciencia climática durante el pasado decenio, muchos investigadores dicen que los modelos informáticos han mejorado, las estimaciones del clima de la antigüedad son más precisas y el conocimiento se va asentando sobre bases firmes. No anda Lindzen tan seguro. Para sus adentros piensa que el caso del calentamiento global está tan verde como cuando comenzó su cruzada, en 1988. La investigación sobre el clima, insiste, está "contaminada por la retórica política, mientras las pruebas esgrimidas son extremadamente endebles".

CIENCIA Y SOCIEDAD

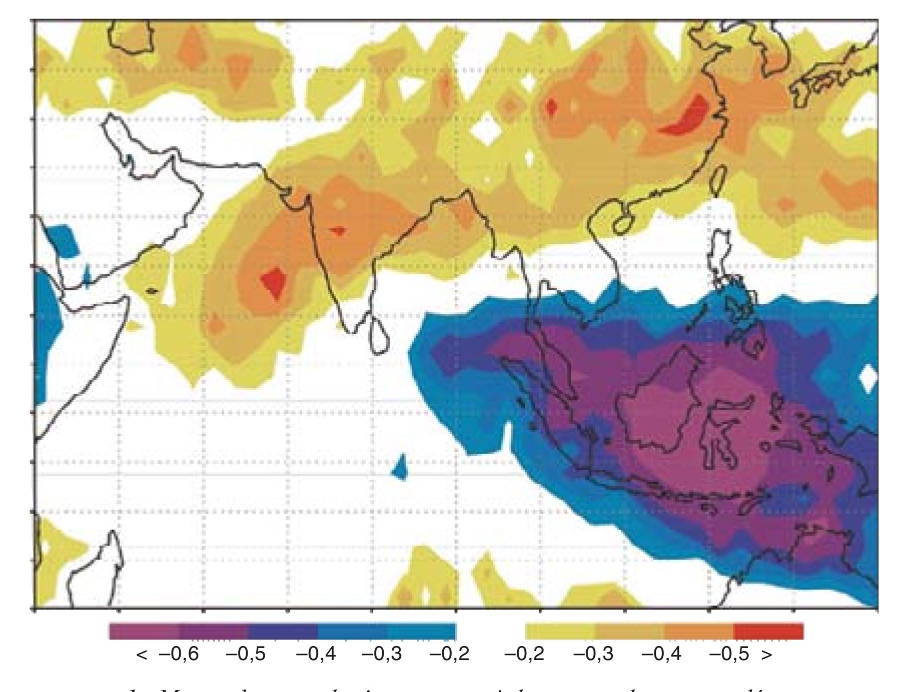
El cólera y El Niño

Bangladesh como ejemplo

La propagación de las epidemias de cólera y la influencia que el fenómeno del ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) en particular y el clima en general tienen en aquéllas, viene siendo desde hace tiempo objeto de debate científico.

En los dos últimos siglos se han producido siete grandes pandemias. Bajo la postrera, iniciada en 1961, nos hallamos todavía. Sólo en la primera mitad del siglo XX, el cólera se cobró más de 780.000 vidas. Se suponía que la temperatura del agua y la pluviosidad en determinadas zonas de los océanos Pacífico e Indico (en conexión con El Niño) intervenían en la dinámica de la enfermedad. Pero no había pruebas concluyentes que pudieran hacer pensar en la validez de dichas hipótesis. Por dinámica de la enfermedad se entienden los patrones estacionales y su modulación multianual, no estacionaria.

El estudio de los archivos del antiguo Imperio Británico relativos a Bangladesh y la India revela variaciones en el momento del inicio de una epidemia, que pueden oscilar entre unos meses y un año. Existen, además, grandes divergencias entre los patrones de unos años a otros. En los años post-El Niño, se producen epidemias en primavera (con una letalidad promedio en exceso, superior a las 15.000 víctimas) y se registra un cambio en los patrones estacionales normales, típicamente con dos picos en un año (uno menor en primavera y uno mayor en el otoño o principios de invierno). Pero tal bimodalidad no es extensible a algunas regiones del continente asiático, lo que complica la comprensión de la dinámica de la enfermedad.



1. Mapa de correlaciones espaciales entre las anomalías de temperatura del agua superficial del Pacífico central y una variable atmosférica que permite trazar la circulación troposférica del aire. Los patrones que aparecen están inducidos por El Niño y median entre éste y el cólera

Los patrones típicos descritos para el sur de Asia incluyen dos picos o máximos anuales, uno antes y otro después del monzón, siendo este último el que presenta los valores más elevados de mortalidad.

Aunque se ignora la razón, los Sundarbans (Bangladesh), una inmensa zona húmeda en la desembocadura de los ríos Ganges y Brahmaputra, parecen constituir la zona de origen y el hábitat perfecto para la persistencia del cólera. Y si bien la última pandemia no se inició en los Sundarbans, sino en las islas Célebes, la enfermedad persistió en Bangladesh, de donde no se ha erradicado nunca. La multiplicidad de microhábitats, el amplio rango de condiciones ambientales que se dan en esta región, unido a factores tales como la elevada humedad del aire, y las grandes cantidades de materia orgánica y material en suspensión en ríos y charcas, pueden ser, junto a las altas temperatura del aire y del agua, claves para asegurar su persistencia.

Hay cepas bacterianas toxigénicas que coinciden en el espacio y el tiempo (*Vibrio cholerae* 01) con otras que no desarrollan la enfermedad (*Vibrio cholerae* no-01 y también vibriones no aglutinables). Pero carecemos de pruebas concluyentes de que *V. cholerae* sobreviva en un medio líquido durante el período interepidémico en una zona donde la bacteria es endémica.

La fase interepidémica dura meses. En el golfo de México se han encontrado cepas endémicas toxigénicas de *V. cholerae* 01 que han sobrevivido años, incluso en ausencia de infecciones humanas. Su análisis mostró que diferían de las cepas El Tor, características de la séptima pandemia en curso en el mundo. Podrían darse también asociaciones de la bacteria en su forma toxigénica con diferentes organismos, cianofíceas, animales y plantas. Medran alrededor de ríos, en valles y tierras bajas, en áreas de notable densidad de población y

en zonas con una elevada humedad ambiental.

El desconocimiento de reservorios de la población bacteriana, unido a la dificultad de identificar el biotipo en un momento dado, complica aún más el cuadro de relaciones. Sin olvidar un obstáculo añadido: el control de la dinámica poblacional cuando acontece una epidemia.

La serie temporal que hemos analizado, correspondiente a los individuos infectados por *V. cholerae* en Dhaka entre 1980 y 1998, contiene en su estructura las trazas de El Niño. Mediante la separación en sus componentes fundamentales e independientes entre sí, es posible determinar la existencia de un período característico en dicha enfermedad alrededor de unos 3,7 años. El Niño sería el responsable de las variaciones interanuales que manifiesta la enfermedad y parecería ir asociado al segundo pico del año, de otoño-invierno.

Si aplicamos el mismo tratamiento de descomposición frecuencial a la serie de anomalías de temperatura en la superficie del océano Pacífico tropical, podemos observar entre los componentes ortogonales el correspondiente al período de 3,7 años. En el mismo análisis se aprecia que las relaciones entre las anomalías del Pacífico y los brotes de cólera no siempre se suceden de igual modo, ni la amplitud de éstos responde de una manera lineal a la intensidad del calentamiento del Pacífico. Sí parece claro que estas anomalías de temperatura preceden a la aparición de epidemias en un intervalo de 10 a 11 meses.

En los últimos años, y en especial desde 1976, la naturaleza de las fases cálidas del ENSO parece haberse modificado. Por lo menos la estructura de los episodios de El Niño acaecidos desde entonces ha variado; recuérdese, por ejemplo, la anómala duración y desarrollo del episodio de 1991-1994 o el reducido intervalo de tan sólo 14 años entre fases cálidas sucesivas muy intensas, como las de 1982-83 y 1997-98.

Esta variabilidad reciente tan notable complicó la elaboración de un modelo matemático o estadístico capaz de anticipar la aparición de epidemias en Bangladesh. Para salvar las dificultades, se creó un modelo no lineal y no paramétrico, que interpretara el comportamiento no estacionario del cólera. De acuerdo con el modelo, las variaciones interanuales no mostraban un patrón único constante, sino que se observaban unos años con picos insólitamente grandes de personas infectadas y otros cuyos valores totales eran mucho menores.





2. Inundaciones en Bangladesh

El modelo no lineal, de elevada dimensión, incluía toda la variabilidad explicada por factores o parámetros no conocidos *a priori*, pero que se sabe que influyen en la evolución futura de la enfermedad. Por mencionar un ejemplo, los factores asociados a la dinámica social y humana antes, durante y en respuesta a la aparición de una epidemia.

Importa, en efecto, conocer el número de individuos expuestos a la infección; este dato no depende

sólo de la pirámide demográfica (los niños corren un riesgo mayor), sino también del número de personas infectadas en epidemias anteriores. El número de individuos sensibles a la infección depende, en gran medida, de los que lograron sobrevivir a conatos epidémicos previos.

En la propagación de las epidemias desempeña un papel destacado la movilidad de la población. Ante un brote, se producen movimientos migratorios, impulsados por las condiciones miserables de pueblos sin infraestructura y sin una adecuada red de distribución del agua. Cuando ocurren fenómenos meteorológicos catastróficos, previos a la aparición de una epidemia, esas instalaciones endebles quedan arrasadas. Añádase a ese cuadro la frecuente infección por malaria, que debilita las defensas de los individuos ante cualquier nueva enfermedad.

Nuestro modelo está capacitado para recoger gran parte de esa variabilidad. El ajuste del mismo, para el período de 1980 a 1998, resultó ser muy bueno, aunque no garantiza su validez en el futuro debido a la fluctuación de los parámetros climáticos y ecológicos, que modulan las relaciones entre los diferentes fenómenos.

Una primera consecuencia extraída es que, para describir adecuadamente las variaciones del cólera, el ENSO constituye un parámetro indispensable, junto con el resto de factores ligados a la dinámica interna del propio brote epidémico. El mejor modelo se obtiene cuando se tienen en cuenta las temperaturas superficiales del agua del Pacífico central, con una anticipación máxima de unos dos meses.

Las relaciones entre el Niño en el Pacífico y el cólera en Bangladesh se establecen a través de un complejo entramado de mecanismos intermedios. El calentamiento anómalo en el Pacífico tropical coincidente con una disminución de los vientos alisios en el ecuador lleva consigo la alteración de la circulación atmosférica tropical a gran escala.

La alteración en la circulación tropical provoca un incremento de la subsidencia del aire en el océano Indico, fenómeno que se detecta en conexión con El Niño, con un desfase de unos 4 a 5 meses con respecto al máximo de temperaturas superficiales en las aguas del Pacífico tropical. Esa circulación Walker ecuatorial, así se llama, debilita la célula Hadley en el océano Indico. Dicha célula atmosférica conecta el ecuador con los trópicos, mediante la circulación ascendente del aire hasta la alta troposfera y su flujo hacia latitudes más altas. Entonces, a unos 30º de latitud, el aire desciende hasta la superficie. Este aire en altura es el que en último lugar modifica los patrones atmosféricos regionales y se convierte en mediador entre El Niño y el cólera.

En las fases cálidas del Niño, el debilitamiento en la circulación zonal ligado a la célula Hadley del océano Indico comporta una disminución en la nubosidad regional e incrementa allí la radiación solar incidente. La zona afectada abarca el norte de India y Bangladesh, así como regiones meridionales de la cordillera del Himalaya. Aumentan las temperaturas superficiales del aire y del agua y se registra una mayor proliferación local de la bacteria.

En este trabajo, que aún se prolongará como mínimo tres años más, colaboran universidades y centros de investigación de tres continentes. Cuando se establezca qué variables ambientales locales son fundamentales en la dinámica del cólera, podremos anticipar qué medidas preventivas deben tomarse ante nuevos brotes epidémicos devastadores.

Xavier Rodó
Centro de Meteorología y Climatología. Dpto. de Ecología de la Universidad de Barcelona

Geometría y nanotécnica

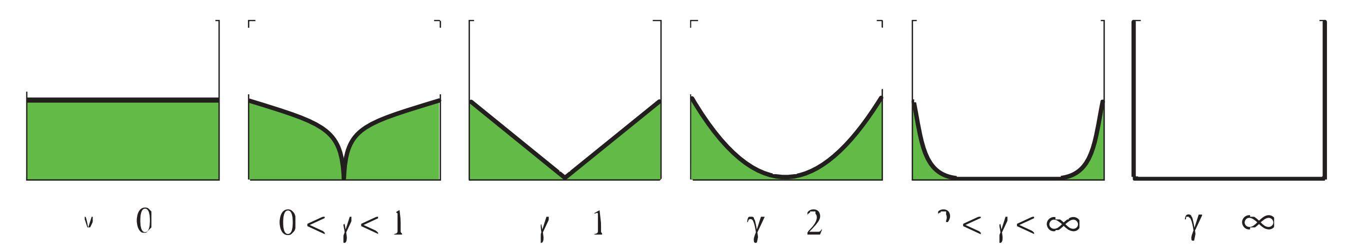
Adsorción de líquidos en substratos no planos

Las superficies de los sólidos se encuentran a menudo en contacto con gases. Cuando eso ocurre, las moléculas del gas interactúan entre sí y con la superficie sólida o substrato.

En determinadas circunstancias, esa doble interacción promueve la aparición de una capa líquida en la superficie del substrato, en particular cuando el gas está casi saturado de alguna de las substancias que lo componen. En un día húmedo, por ejemplo, el aire se encontrará casi saturado de agua (la saturación ocurre cuando la humedad es del 100 %). En tal situación, gran parte de los sólidos a nuestro alrededor aparecerían recubiertos por una fina capa de agua, cuyo grosor depende de la temperatura y la composición del gas, así como de la naturaleza del substrato sólido. Dicha capa líquida es de carácter microscópico, imperceptible a simple vista. Pese a ello, ejerce una influencia notoria en el ángulo de contacto de gotas macroscópicas depositadas sobre la superficie y puede favorecer la degradación química del substrato; se interpone, por ejemplo, entre la punta y la muestra en el microscopio de fuerza atómica.

Como regla general, el grosor de la capa aumenta con la temperatura y con el grado de saturación del gas, conservando siempre el carácter microscópico. Sin embargo, por encima de una cierta temperatura (denominada temperatura de mojado), que depende de la naturaleza de los gases y del substrato, la capa adsorbida crece excepcionalmente, hasta adquirir carácter macroscópico cuando el gas se satura (cuando la humedad es del 100 % en nuestro ejemplo). En ese punto, la capa líquida se percibe a simple vista: el sólido está mojado. La ley que describe este fenómeno de mojado completo depende del tipo de interacción entre las moléculas; varía de modo esencial si se cambian dichas interacciones.

Todo este panorama, que ha precisado de más de dos décadas para su comprensión, sólo es válido si el substrato es plano. En cambio, si el substrato tiene cierta forma a escala mesoscópica (o incluso nanoscópica), varía de un modo drástico. Este fenómeno reviste sumo interés hoy, habida cuenta



Diversas secciones del substrato "deformable" para distintos valores del parámetro γ. Los valores límite $\gamma = 0$ y $\gamma = \infty$ corresponden, respectivamente, a un substrato plano y a dos substratos planos enfrentados (unidos por una base plana). De este modo se puede "conectar", de manera continua, mojado completo y condensación capilar, y estudiar el efecto de la geometría superficial en la adsorción de líquidos

de los avances recientes en construcción y caracterización de substratos estructurados a esa escala, así como en la manipulación de cantidades ínfimas de líquidos.

Para demostrar la influencia determinante de la geometría superficial en la adsorción, podemos comparar el sistema descrito —un substrato plano en contacto con un gas casi saturado— con otro sistema, construido con los mismos materiales pero diferente forma. Consideremos un gas en contacto con dos substratos planos paralelos y separados cierta distancia λ. Se produce un nuevo fenómeno: la condensación capilar.

Al aumentar el grado de saturación del gas a una temperatura por encima de la temperatura de mojado, observamos que aparecen dos finas capas líquidas, adsorbidas en sendos substratos. Las capas crecen con el grado de saturación del gas, de manera análoga al sistema con un solo substrato. Pero ahora, al llegar a cierto grado de saturación, el espacio entre los substratos se llena de líquido de manera abrupta. Esto ocurre a pesar de que la saturación no es completa (es decir, la humedad, por volver a nuestro ejemplo, es menor del 100 %) y el líquido no debería condensarse. La condensación capilar viene descrita por la ecuación de Kelvin, que no depende de ninguna magnitud microscópica, a diferencia del caso anterior, que dependía del tipo de interacción entre las moléculas.

En resumen, la adsorción en un substrato plano depende de las interacciones moleculares, mientras que en dos substratos paralelos sólo depende de magnitudes macroscópicas. Trabajando con Andrew Parry, en el departamento de matemáticas del Colegio Imperial de Londres, nos surgió la pregunta: ¿Cómo puede la geometría superficial "desconectar" la influencia de las interacciones microscópicas entre las partículas?

Para averiguarlo, decidimos estudiar teóricamente el fenómeno de adsorción de líquidos en un substrato "deformable" caracterizado por un parámetro γ tal, que cuando $\gamma = 0$ el substrato era perfectamente plano y cuando $\gamma = \infty$ el substrato consistía en dos paredes paralelas unidas por una base plana y separadas cierta distancia λ (*véase la figura*).

Podíamos, pues, conectar de manera continua ambos sistemas, lo que nos permitiría, a su vez, estudiar la transformación del mojado completo en condensación capilar. De entre los valores intermedios de γ, dos resultaron tener especial importancia: $\gamma = 1$, que correspondía a un substrato formado por dos planos que se cruzan, y $\gamma = 2$, un substrato con forma parabólica.

La descripción teórica de la adsorción en el substrato "deformable" resultó harto difícil. No podía abordarse con los métodos teóricos desarrollados para el caso de substratos planos, que sólo resultaron aplicables en situaciones especiales; entre ellas, el substrato descrito por $\gamma = 1$ y los descritos por $0 < \gamma < 1$ (pero éstos sólo en determinadas condiciones). Nos encontrábamos ante un sistema complejo, aunque conocíamos bien ciertos límites.

Tras diversos intentos infructuosos de adaptar las técnicas desarrolladas para substratos planos a nuestro sistema, descubrimos —para nuestro asombro— que una descripción del fenómeno en términos geométricos daba cuenta de la transformación gradual del mojado en condensación capilar. Sólo necesitábamos el grosor de la capa adsorbida en el substrato plano, que incorpora la influencia de las interacciones microscópicas, y el radio de curvatura proporcionado por la ecuación de Laplace para la frontera entre medios con distinta presión.

La descripción geométrica recupera los casos conocidos: mojado completo ($\gamma = 0$), condensación capilar ($\gamma = \infty$) y substratos con $0 < \gamma \leq 1$ (en las condiciones en las que se podían tratar con métodos tradicionales).

La transformación del mojado en condensación capilar tiene lugar a través de una complicada serie de fenómenos en los que las interacciones microscópicas y la geometría (caracterizada por el parámetro γ) entremezclan sus efectos. A tenor de la forma de la pared y del grado de saturación del gas, el grosor de la capa adsorbida obedece diferentes leyes de crecimiento, caracterizadas en mayor o menor medida por la geometría. Esto permite modificar la adsorción con tan sólo variar la forma de la superficie del substrato.

Predice la teoría una serie de fenómenos que no habían sido descritos hasta ahora, como la aparición continua de meniscos líquidos o su fusión, de potencial aplicación en nanotécnica y en el manejo de cantidades ínfimas de líquidos.

CARLOS RASCÓN DÍAZ
Depto. de Matemáticas,
Universidad Carlos III de Madrid

Tumores cerebrales

Tasa de proliferación

La obtención de imágenes de resonancia magnética (IRM) es una técnica de creciente aplicación en el diagnóstico no invasivo de tumores cerebrales humanos. A través de la misma distinguimos el parénquima cerebral sano de las zonas afectadas por una patología tumoral.

Sin embargo, la IRM no permite siempre especificar el tipo de tumor detectado u otros parámetros de interés clínico, como el grado (malignidad) del tumor o la existencia de zonas con distinta tasa de proliferación celular, cuestiones de gran interés a la hora de planificar el enfoque quirúrgico o terapéutico idóneo. Sabemos, por ejemplo, que las zonas no proliferativas de un tumor son insensibles a muchas de las estrategias de quimio y radioterapia clásicas, aunque puede provocarse su sensibilización.

Con la aplicación de la espectroscopía de resonancia magnética (ERM), técnica complementaria de la IRM, podemos obtener un diagnóstico más depurado. La ERM permite obtener un patrón metabólico del estado estacionario del tejido, así como seguir cambios en dicho patrón a lo largo del tiempo, sin daño alguno para el paciente. Lo mismo que en el caso de la IRM, puede repetirse la exploración cuantas veces se crea conveniente.

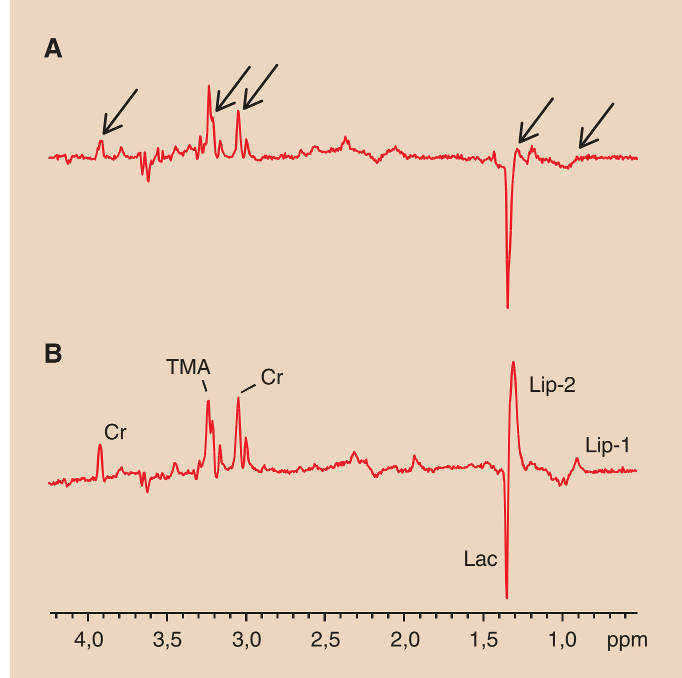
En la zona necrótica del tumor hay gotículas extracelulares, de tamaño notable (5-10 micrómetros de diámetro). Encierran esas bolsas ácidos grasos de lípidos neutros, principalmente triacilgliceroles. Se supone que el patrón espectral con resonancia de los lípidos móviles visibles por ERM (LM) se debe a los grupos metilo y metileno de dichos ácidos grasos. Pero, ¿cuál es el origen de esta señal en aquellos casos en que aparecen LM?

Con el fin de conocer si los cambios observados en el patrón espectral de los tumores astrocíticos agresivos de cerebro humano (glioblastoma multiforme) podían darnos información de interés acerca del estado de la proliferación tumoral utilizamos un modelo celular, las células C6 de glioma de rata.

Demostramos que la presencia del pico de "lípidos móviles" en el patrón espectral de células C6, similar al observado en ciertos tumores cerebrales humanos, se correspondía cualitativa y cuantitativamente con la presencia de gotículas lipídicas intracelulares de 1,5 mi-



1. Imagen por resonancia (IRM) de parénquima cerebral humano in vivo *de un paciente aquejado de glioblastoma multiforme, un tumor de tipo astrocítico muy agresivo. Se observa una morfología anormal en el extremo inferior izquierdo de la imagen. Centrado en el tumor, el recuadro marca la zona o elemento de volumen (vóxel) del cual se obtendrá un espectro de resonancia magnética nuclear de protón (ERM)*

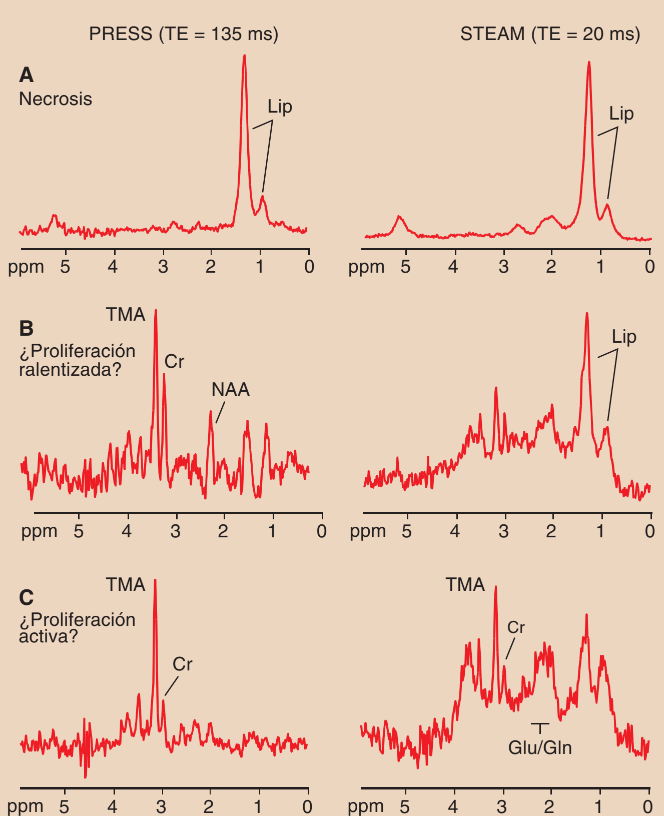


2. Patrón espectral de ERM de protón obtenido a 9,4 teslas de células C6 de glioma de rata en la fase exponencial de la curva de crecimiento (A) *y en la fase de posconfluencia* (B)*. La escala horizontal de desplazamiento químico (ppm) se corresponde con la de la figura 3. Lac, lactato, el resto de resonancias, como en la figura 3. Figura reproducida del artículo de Barba y col. (Cancer Research 59: 1861-1868, 1999) con el permiso de la American Association for Cancer Research*

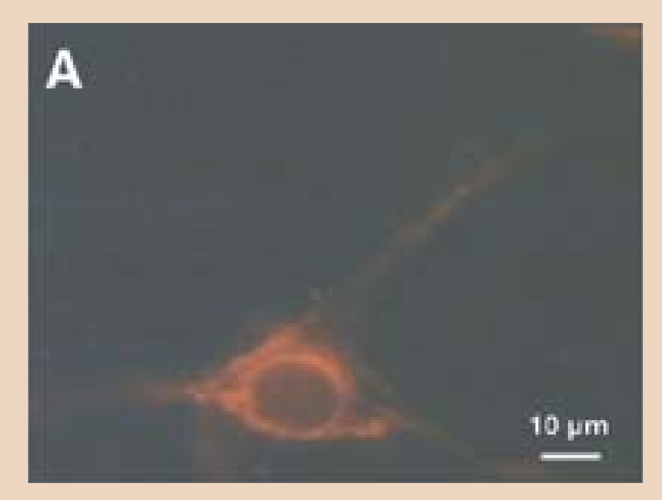
crómetros de diámetro rellenas de triacilgliceroles, detectadas mediante microscopía de fluorescencia.

Las gotículas se acumulaban en las células C6 si éstas dejaban de proliferar después de cubrir la superficie de la placa de cultivo y empezar a apelotonarse (fase de posconfluencia en la curva de crecimiento del cultivo celular), mientras que no se detectaban en células C6 en estadio de proliferación activa (fase exponencial de la curva de crecimiento).

Si extrapolamos los resultados obtenidos con cultivos celulares al caso de los tumores astrocíticos humanos, podemos proponer que los cambios detectados en el patrón espectral de LM en los espectros de tumores astrocíticos *in vivo*, en ausencia de necrosis, indican cambios en la tasa proliferativa de las células tumorales en la región investigada por ERM. De cumplirse la hipótesis, cabría abordar un enfoque individualizado de la terapia a aplicar al paciente, con la mejora consiguiente del resultado.



3. Tipos extremos de patrones espectrales de ERM de protón obtenidos a 1,5 teslas de vóxeles situados en el interior de tumores del tipo glioblastoma multiforme en tres pacientes distintos (A, B y C). *Los espectros de la columna de la izquierda se han adquirido (secuencia PRESS) en condiciones llamadas de tiempo de eco largo (135 ms), que filtran las señales procedentes de macromoléculas, mientras que en la columna de la derecha se muestran espectros de los mismos vóxeles, pero (secuencia STEAM) a tiempo de eco corto (20 ms). El patrón espectral en el caso A correspondería al de un tumor necrótico; el del caso C, a una zona en proliferación activa (similar a los espectros de células C6 en la figura 2A), y el caso del paciente B, a una situación intermedia aún por caracterizar. Lip, ácidos grasos en triacilgliceroles; Cr, Creatina y fosfocreatina; TMA, compuestos con grupo trimetilamina; Glu, glutamato; Gln, glutamina, NAA, compuestos con grupo N-acetil*





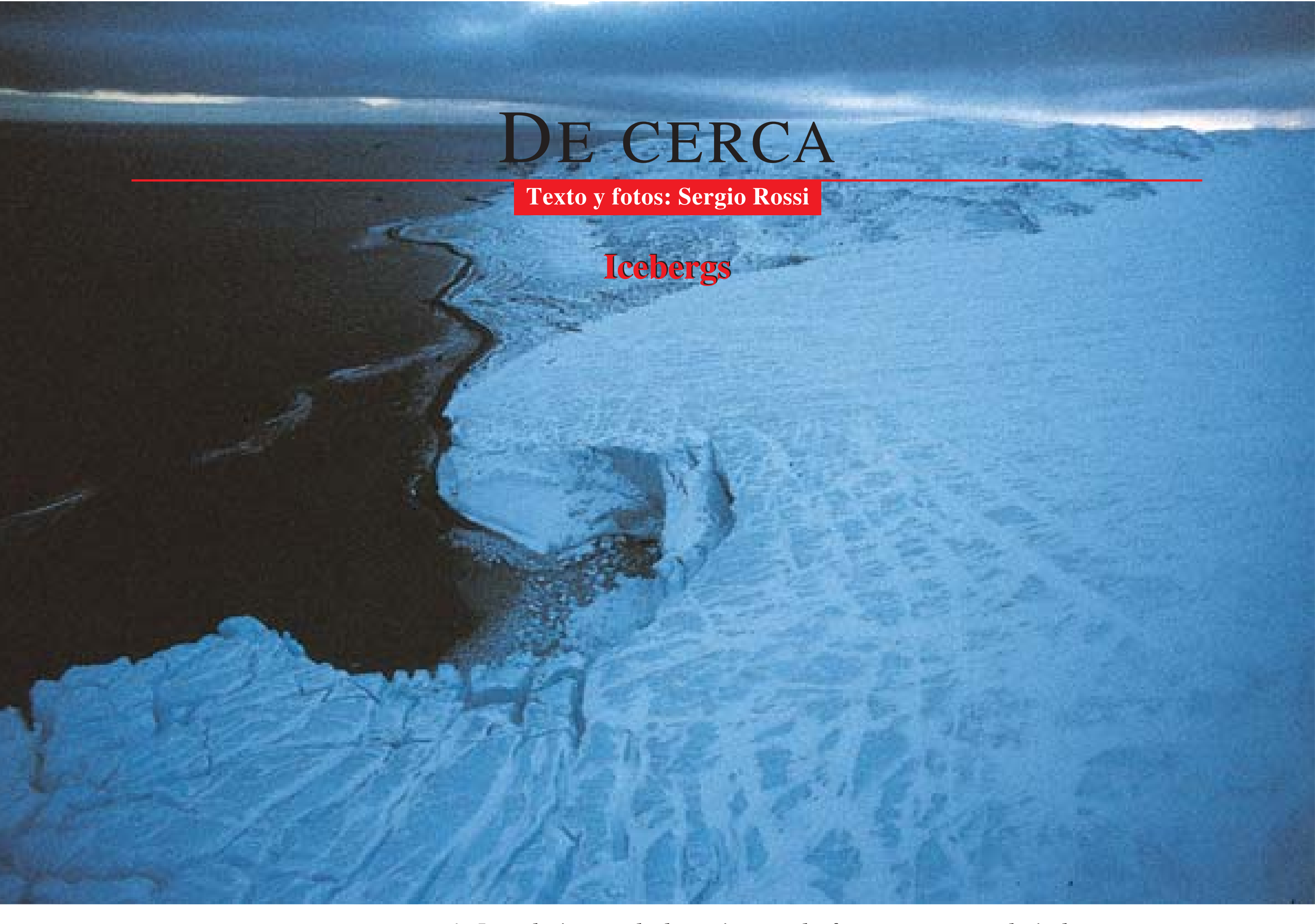
4. Micrografías de fluorescencia de células C6 de glioma de rata en cultivo, teñidas con el colorante rojo de Nilo, que destaca el entorno hidrofóbico de gotículas citosólicas de triacilgliceroles con una fluorescencia amarillo-dorada. En A se muestra una célula típica de la fase de crecimiento exponencial, mientras que en B se muestran células características de la fase de posconfluencia. Figura reproducida con modificaciones del artículo de Barba y col. (1999) con el permiso de la American Association for Cancer Research

IGNASI BARBA, MIQUEL CABAÑAS
y CARLES ARÚS
Depto. de Bioquímica y Biología Molecular,
Unidad de Ciencias
Universidad Autónoma
de Barcelona

DE CERCA

Texto y fotos: Sergio Rossi

Icebergs



1. Los glaciares y la banquisa son la fuente que nutre de icebergs los mares polares. Este glaciar se halla en la Península Antártica, cerca de la base germano-argentina de Jubany

Las inmensas masas de hielo, los icebergs, que flotan sin rumbo aparente en los océanos polares han fascinado y atemorizado desde siempre a los seres humanos. Nacidos de glaciares y de la banquisa, los icebergs se desprenden debido a la erosión que las aguas ejercen bajo la masa de hielo, fragmentándola y dejándola a la deriva.

Una vez en el mar, el iceberg está condenado a desaparecer en un período bastante breve: unos dos o tres años, diez a lo sumo si el bloque de hielo es grande y se queda atrapado en una zona en la que las temperaturas sean bajas y la acción erosiva del mar no resulte tan agresiva. Las dimensiones oscilan desde unas pocas decenas de metros hasta kilómetros, pero su masa es inestable y tiende a fragmentarse con facilidad. Los colores de los icebergs nos relatan en parte el origen y longevidad del hielo; icebergs grises pueden denotar origen en una zona volcánica, mientras que los de azul intenso demuestran gran antigüedad del hielo, al haber expulsado la inmensa presión el aire interior (lo que hace que el hielo filtre todos los colores excepto el azul).

Mientras la masa de hielo flote, servirá de plataforma para focas y pingüinos, en su superficie, y fuente de vida por debajo (algas microscópicas, pequeños crustáceos, etc.). Pero en muchos casos también es fuente de destrucción, pues la parte inferior de los icebergs “ara” literalmente el fondo, arrasando las comunidades que allí se encuentren (esponjas, briozoos, gorgonias y otros). Una vez han vagado errabundos, el peso los vence y voltea, quedando al descubierto formas singulares, fruto de una acción continuada de las corrientes marinas que los van disolviendo poco a poco. Al final, si entran en mar abierto, su descomposición se acelera debido al oleaje, para acabar desapareciendo.

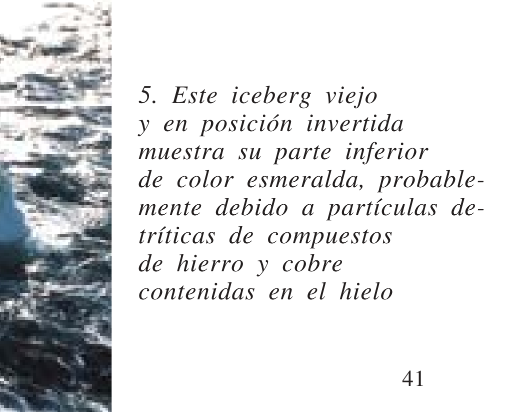


2. Los icebergs tabulares pueden llegar a medir kilómetros de longitud y decenas de metros de altura. Con el tiempo se fragmentarán y generarán icebergs de menor tamaño



3. El azul intenso denota pureza. Este iceberg proviene de hielo que ha estado a muy elevadas presiones; liberado el gas de su interior, queda una estructura que absorbe todos los colores excepto el azul

4. Ya a la deriva, los icebergs adquieren formas fascinantes. El que la parte inferior haya pasado a la superficie o la acción del mar los torna más redondeados, perdiendo todos los "ángulos" típicos de los jóvenes



5. Este iceberg viejo y en posición invertida muestra su parte inferior de color esmeralda, probablemente debido a partículas detríticas de compuestos de hierro y cobre contenidas en el hielo

Las escorias y tierras cocidas de la Pampa

Los enigmáticos fragmentos vítreos asociados a otros parecidos a ladrillos que se encuentran en los sedimentos de la Pampa argentina cercanos a Mar del Plata se deben al impacto de un asteroide, ocurrido hace 3,3 millones de años

Marcelo A. Zárate y Peter H. Schultz

La Pampa, la vasta llanura del centro este de Argentina y una de las principales regiones agrícolas del mundo, goza de justificada fama por la fertilidad de sus suelos. Se desarrollaron éstos a partir de depósitos de loess y arenas compuestos por partículas de origen volcánico, transportadas por el viento desde el oeste y sudoeste, al pie de los Andes. Partículas que se acumularon en la Pampa durante la época glacial. El examen de los terrenos subyacentes bajo esa cubierta superficial de loess y arenas revela la existencia de varias centenas de metros de depósitos de composición similar, denominados sedimentos loessoides, redepositados por el agua y el viento en el extenso ambiente de llanura desde el Mioceno tardío, hace unos 12 millones de años.

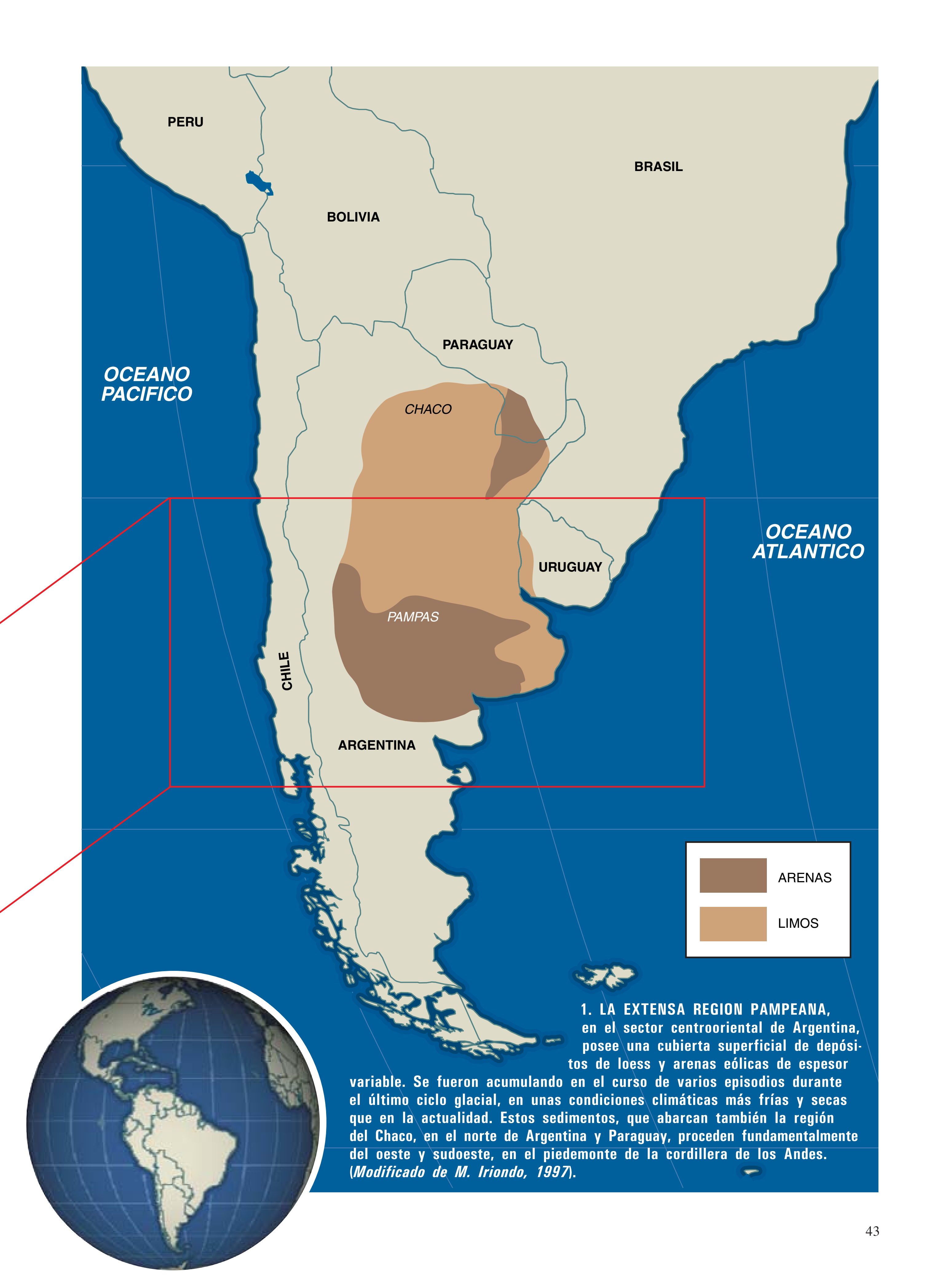
Los depósitos sedimentarios constan de numerosos niveles y encierran restos abundantes de vertebrados fósiles. Los acantilados costeros de Chapadmalal, cercanos a Mar del Plata, en el litoral atlántico del sudeste de la provincia de Buenos Aires, y las barrancas del río Paraná son las dos localidades principales. En ellas encontramos extensos cortes naturales de los depósitos pampeanos del Plioceno y Cuaternario, con espesores de entre 20 y 30 metros. Allí se han llevado a cabo los estudios más detallados para conocer la historia geológica y biológica de los últimos millones de años de la llanura.

En los depósitos sedimentarios aflorantes en Chapadmalal aparece un nivel que contiene unos materiales vítreos, vesiculares, de colores muy brillantes, verdosos o negruzcos. Se les llama escorias por su parecido con los productos de fundición. Por su aspecto recuerdan ciertas rocas volcánicas. Suelen acompañarse de unos fragmentos endurecidos, de color rojo ladrillo, las tierras cocidas. Ambas denominaciones —escorias y tierras cocidas— fueron ampliamente divulgadas por Florentino Ameghino, científico argentino de fines del siglo XIX y comienzos del XX que sentó las bases del conocimiento paleontológico y geológico de la Pampa.

Ameghino situaba el origen del hombre en la Pampa, durante el Terciario. Desde allí emigraría al resto del mundo. Los hallazgos de escorias y tierras cocidas que hiciera Ameghino, estaban vinculados con materiales arqueológicos que habían aparecido incrustados en los niveles inferiores de los depósitos pampeanos. Por tanto, juzgó que las escorias y tierras cocidas habían resultado de la fusión de loess a causa de las altas temperaturas originadas por los fogones encendidos por los primeros hombres, aunque los sedimentos de Chapadmalal donde se las encontraban eran de edad terciaria.



Basándose en ese supuesto antropogénico, Ameghino se apoyó en las escorias y tierras cocidas del loess pampeano para apuntalar su teoría. El problema



1. LA EXTENSA REGION PAMPEANA, en el sector centrooriental de Argentina, posee una cubierta superficial de depósitos de loess y arenas eólicas de espesor variable. Se fueron acumulando en el curso de varios episodios durante el último ciclo glacial, en unas condiciones climáticas más frías y secas que en la actualidad. Estos sedimentos, que abarcan también la región del Chaco, en el norte de Argentina y Paraguay, proceden fundamentalmente del oeste y sudoeste, en el piedemonte de la cordillera de los Andes. (*Modificado de M. Iriondo, 1997*).



2. ACANTILADOS DE CHAPADMALAL, al sur de Mar del Plata. Constituyen una de las localidades más conocidas de los depósitos pampeanos, famosa por la abundancia de restos fósiles de vertebrados. A lo largo de unos 30 kilómetros del frente acantilado erosionado por el mar, aparece expuesto el registro sedimentario de los últimos 4 a 5 millones de años, caracterizado por numerosos niveles de suelos enterrados que ha permitido reconstruir la historia del paisaje. El nivel de escorias se indica con la letra E.

planteado por esos materiales desató acalorados debates en los que intervinieron los científicos de la época. Inmersa en el marco del origen del hombre en las Pampas durante el Terciario, la génesis de las escorias y tierras cocidas se relacionó con distintos procesos. Poco antes de su muerte en 1911, Ameghino modificó parcialmente su interpretación y sostuvo que, en realidad, las escorias y tierras cocidas se debían a incendios intencionados de pastizales de gramíneas pampeanas muy ricas en sílice, por parte de los indígenas que así intentaban cazar a los animales.

Por la misma época, el antropólogo Lehmann Nitsche, en una variante de la interpretación de Ameghino, atribuyó la formación de escorias y tierras cocidas a incendios espontáneos de pajonales en terrenos pantanosos constituidos por especies de gramíneas de gran tamaño y ricas en silicatos. Por su parte, el geólogo Santiago Roth, basado en el aspecto, identificó las tierras cocidas con fragmentos de alfarería, sumándose a la tesis de Ameghino.

En realidad cualquier vinculación de las escorias y tierras cocidas con actividad humana quedaba completamente descartada al descubrirse que la llegada de los primeros grupos humanos a Sudamérica databa de tiempos más recientes, del Pleistoceno tardío, hace unos 12.000 años, mientras que estos materiales se hallaban en depósitos sedimentarios varios millones de años anteriores al poblamiento del continente.

Pero, ¿por qué Ameghino las encontró en asociación frecuente con yacimientos arqueológicos? ¿Eran esos fragmentos de escorias y tierras cocidas realmente iguales a los que se hallaban en los niveles terciarios? Quizá tomara por escorias y tierras cocidas otros productos de apariencia similar que sí podían haber sido la resultante de incendios o fogones o de procesos artificiales como la fundición en hornos. Pese al parecido en su aspecto general, las escorias y tierras cocidas del loess pampeano difieren sustancialmente en su composición química y en sus características microscópicas de estos

otros productos artificiales. También pudieron darse fragmentos de escorias redepositados en niveles más recientes y asociados secundariamente a restos de actividad humana, o inclusive materiales arqueológicos incorporados adrede en los depósitos terciarios.

A la hipótesis de Ameghino se opusieron en un comienzo los defensores del origen volcánico. En 1908 Félix Outes, Enrique Herrero Ducloux y H. Bucking publicaron sus análisis químicos y microscópicos y observaciones de campo de las escorias y tierras cocidas. Llegaban a la conclusión de que se trataba de fragmentos de lavas andesíticas, es decir, rocas volcánicas. No obstante, la primera referencia a las escorias apareció en 1866, en un escrito de dos geólogos suizos, Heusser y Claraz, quienes visitaron los acantilados de Chapadmalal y los describieron como fragmentos de rocas volcánicas.

Herrero Ducloux demostró experimentalmente que el loess, al fundirse a temperaturas comprendidas entre 1300 ºC y 1350 ºC, adquiría un aspecto similar al de escorias volcánicas. Además, señaló que la composición química de las escorias y tierras cocidas indicaba que no podían ser el resultado de una mezcla de cenizas vegetales y de loess, en contra de la hipótesis de los incendios de gramíneas ricas en sílice. Outes agregó que, si ese proceso hubiese continuado en la actualidad, deberíamos encontrar ahora escorias y tierras cocidas en la superficie de la Pampa; y no sucede tal. Y deberíamos también haberlas hallado en todo el espesor de los depósitos pampeanos; pero en Chapadmalal presentan una situación estratigráfica muy acotada, restringida a un nivel, lo que sugiere que su génesis tuvo que ver con un proceso que al menos allí ocurrió sólo una vez en más de 3 millones de años.



3. EL NIVEL DE LAS ESCORIAS Y TIERRAS COCIDAS es uno de los más conspicuos de la sección sedimentaria de Chapadmalal. Se puede seguir a lo largo de varios kilómetros, interrumpido en tramos por la acción erosiva de cursos fluviales posteriores. Las escorias aparecen con tamaños variables desde milímetros hasta decenas de centímetro, alineadas, como en este caso, o dispersas.

Pero la hipótesis volcánica de Outes, Herrero Ducloux y Bucking se venía abajo si se atendía al contexto geológico general. La Pampa es una región estable, ubicada en un margen tectónico pasivo, sin actividad magmática desde el Jurásico tardío, cuando se produjo la efusión de lavas basálticas a raíz del proceso de apertura del océano Atlántico. Las lavas aparecen en el fondo de las cuencas sedimentarias de la Pampa cubiertas por más de 6000 metros de depósitos. Por otro lado, los centros volcánicos más cercanos se hallan a unos 1000 km de distancia hacia el oeste.

Las escorias, que a veces superan los 70 cm y excepcionalmente llegan a los 2 metros de diámetro, se caracterizan por su alta fragilidad y no muestran signos de redondeamiento por transporte. De haber sido fragmentos volcánicos no habrían podido resistir transportes fluviales tan prolongados sin haber sufrido un considerable desgaste hasta desaparecer o bien llegar muy particulados. Esto queda bien demostrado en Chapadmalal, donde aparecen fragmentos de escorias y tierras cocidas en depósitos fluviales del Pleistoceno que suprayacen al nivel de escorias, muy redondeadas y retrabajadas localmente, indicio de su fácil desgaste en cortas distancias. Además, de acuerdo con la configuración general del paisaje, tampoco era posible que se acarrearan desde la cordillera, ya que estos fragmentos se acumularon en su momento en el piedemonte de las sierras de Mar del Plata, que forma parte del sistema serrano de Tandil drenado por ríos y arroyos locales.

El debate sobre el origen de las escorias y tierras cocidas se amplió a raíz de la expedición del arqueólogo Alex Hrdlicka. Llegó éste a la Argentina en 1912 dispuesto a evaluar las pruebas presentadas por Ameghino sobre el origen del hombre en las pampas. Hrdlicka recogió muestras de escorias y tierras cocidas del Plioceno de Chapadmalal, luego estudiadas en Estados Unidos por Fred

Los autores

MARCELO A. ZARATE y PETER H. SCHULTZ son expertos en geología y geofísica. Zárate, del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, se dedica a la estratigrafía del Cuaternario y Terciario tardío de la región pampeana. Schultz, profesor de la Universidad Brown en Providence, estudia los procesos y materiales generados durante la formación de cráteres de impacto en la Luna, Marte, Venus y la Tierra.





4. ASPECTO CARACTERISTICO DE LAS ESCORIAS, fácilmente reconocibles en las exposiciones sedimentarias (*a*). Son materiales vítreos con colores en general oscuros y múltiples vesículas. Pueden presentar superficies estriadas y estructuras plegadas y con aspecto fluidal. (*b*) Las tierras cocidas semejan trozos de ladrillo de color rojizo intenso y consistente; menos abundantes que las escorias y de dimensiones menores, no superan los 40 cm en los fragmentos mayores.

Wright y Clarence Fenner, quienes resaltaron la singularidad de las características microscópicas observadas en las muestras; en su opinión no concordaban con ninguna roca eruptiva o lava. Las muestras de escorias presentaban variaciones en la composición de las plagioclasas, los feldespatos estaban readsorbidos por el vidrio fundido, que era veteado y de composición variable, y los cristales no parecían haber cristalizado a partir de la masa fundida, como era el caso de las lavas típicas.

Los resultados de los análisis microscópicos obtenidos por Wright y Fenner obligaban a rechazar los dos procesos de formación postulados hasta ese momento. En primer lugar, demostraron que las escorias no eran escorias volcánicas, es decir, no eran lavas. Se habían producido por la fusión de un material originariamente clástico, que en todas sus características se parecía al loess de la Pampa. Y las tierras cocidas estaban compuestas por fragmentos de loess endurecidos y enrojecidos por acción del calor entre 850 ºC y 1050 ºC. En segundo lugar, la ausencia de oxidación en las escorias excluía la posibilidad de que se hubiesen formado por fusión a partir de fogatas o cualquier tipo de fuego a cielo abierto.

Como hipótesis alternativa Wright y Fenner propusieron la intrusión de masas ígneas, submarinas, o por debajo del área emergida. Ahí residiría, pensaron, la fuente de calor que produjo la fusión de loess en profundidad. Pero, lo mismo que en el caso del proceso volcánico, la inexistencia de actividad magmática en la Pampa durante el Terciario y Cuaternario invalidaba semejante explicación.

Tenía razón Ameghino sobre la ausencia de signos de transporte fluvial. La tenían Wright y Fenner sobre los aspectos microscópicos, así como Outes en sus experimentos y resultados químicos. Pero se trataba de enfoques parciales. No perseguían tanto la dilucidación de la génesis de estos productos cuanto la solidez de la teoría de Ameghino sobre el origen del hombre.

Pero los procesos alternativos que se propusieron no explicaban la génesis de escorias y tierras cocidas. La teoría del vulcanismo o la de la actividad magmática bajo la superficie quedan refutadas por el carácter no volcánico de la región pampeana, mientras que los experimentos de laboratorio, fusionando loess en hornos, demandaban temperaturas muy altas, imposibles de alcanzar en incendios de campo y menos aún en fogones humanos prehistóricos.

Considerados en su conjunto, sin embargo, esos trabajos descubrían los atributos sobresalientes de las escorias y tierras cocidas. Se comprobó que tenían la composición general del loess de la Pampa; sus formas, dimensiones y situación indicaban que se formaron en la región; no había pruebas de transporte desde distancias lejanas; el calentamiento en hornos a temperaturas muy elevadas había permitido obtener productos similares, y los análisis de microscopía de-

mostraban la existencia de rasgos mineralógicos peculiares, no atribuibles a rocas volcánicas.

También hubo acuerdo general en la vinculación genética de escorias y tierras cocidas, representando las últimas algún tipo de fase en la formación de escorias. Admitíase que las escorias y tierras cocidas resultaron de un proceso de calentamiento muy significativo que había llegado a provocar la fusión parcial del material, aunque se discutía en torno al proceso generador de tan altas temperaturas.

Abandonada la polémica sobre el origen del hombre sudamericano postulado por Ameghino a partir de la refutación de todas las pruebas que la sostenían, el controvertido origen de las escorias y tierras cocidas cayó en el olvido. Durante más de 80 años, las referencias a las mismas se limitaron a señalarlas como un rasgo peculiar y a veces diagnóstico de los niveles pliocenos o miocenos de algunas localidades del sur de la provincia de Buenos Aires. El silencio apenas se rompió con un estudio de laboratorio, realizado en 1969, que las atribuyó a la acción de procesos químicos que ocurrían en el seno del sedimento con posterioridad a su depositación. El mecanismo propuesto sólo intentaba una explicación sobre la ausencia de transporte fluvial, pero no ahondaba en las características mineralógicas, microscópicas y químicas de las escorias y tierras cocidas.

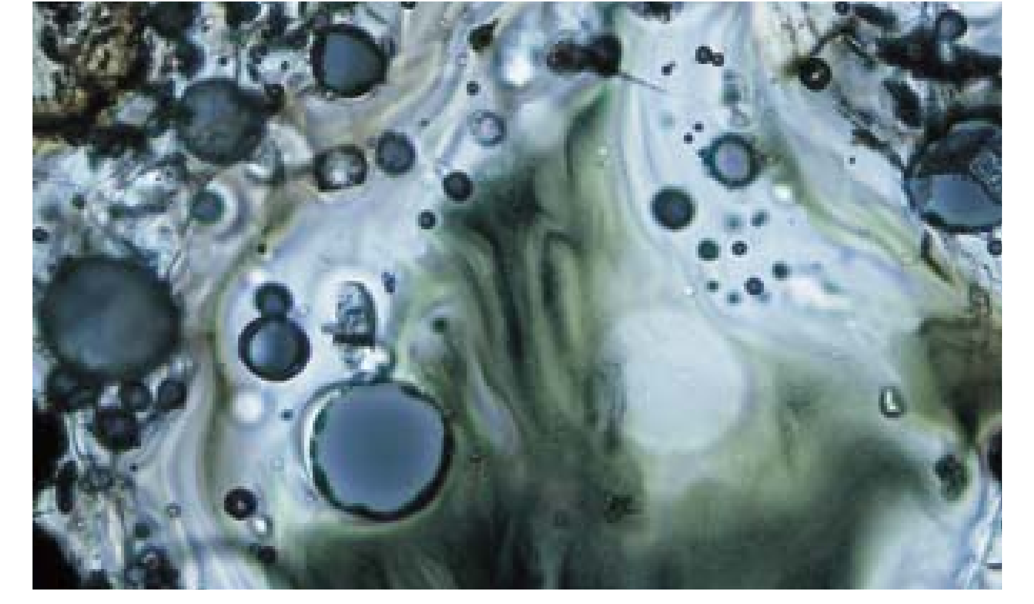


5. CRATERES DE RIO CUARTO, considerados antaño cuencas de deflación eólica. En las imágenes aéreas aparecen alineadas en sentido NNE-SSO y consisten en depresiones elongadas, la mayor de las cuales tiene 4,5 km de largo por 1,1 km de ancho. Se formaron, en realidad, por un impacto de muy bajo ángulo (menor o igual a 15º) de un cuerpo condrítico de aproximadamente 150 a 300 metros de diámetro. Contienen escorias.

En una publicación de 1989, referente a la estratigrafía de los acantilados costeros de Chapadmalal, uno de nosotros (Zárate) mencionó las escorias y tierras cocidas como una característica típica de los niveles terciarios, de origen desconocido, aunque la opinión dominante entonces las atribuía a incendios de campos. Con el inicio del decenio siguiente, comienza un nuevo capítulo en el misterio de las escorias y tierras cocidas. Su estudio arranca, indirectamente, de las observaciones que previamente hiciera Rubén Lianza, piloto de la Fuerza Aérea Argentina, sobrevolando la zona de Río Cuarto, en el sector centrooccidental de la Pampa. Fotografió una serie de depresiones que, según los estudios realizados por el otro autor (Schultz), resultaron un conjunto de cráteres someros de impactos oblicuos, de muy bajo ángulo.

En ese mismo emplazamiento aparecieron unos fragmentos vítreos y vesiculares de colores verdoso a negro oliváceo, cuyo parecido con las escorias de Chapadmalal era asombroso. Incluían partículas de loess parcialmente reabsorbidas en la fracción fundida y estructuras de flujo, burbujas inmiscibles y pequeñas inclusiones. Todas ellas eran características típicas de las impactitas, es decir, de materiales producidos por la fusión parcial o completa de una roca debido al calor generado por el impacto de un asteroide.

Hasta entonces, los autores habían seguido investigaciones independientes, relacionadas con la estratigrafía de los depósitos pampeanos en un caso (Zárate) y con los procesos de impacto de asteroides en otro (Schultz). En 1991 nos pusimos en contacto, tras advertir que compartíamos un mismo interés por las escorias de los cráteres de Río Cuarto y las halladas en las barrancas de Chapadmalal; estas últimas eran del Plioceno y las de Río Cuarto del Holoceno medio. En 1995 realizamos la primera campaña de recolección de muestras de escorias y tierras cocidas en las exposiciones costeras



6. EN CORTES DELGADOS las escorias exhiben las estructuras de tipo schlieren, de aspecto fluidal, con muy buen grado de desarrollo y densidades variables que se traducen en fuertes variaciones en las propiedades ópticas, característica que tipifica a los vidrios originados por impacto. Se aprecian, asimismo, vesículas deformadas y partículas de minerales, descompuestas térmicamente por enfriamiento rápido. Los vidrios aparecen oscurecidos (isótropos) con luz polarizada (escala: base de la foto 1 mm).

de Chapadmalal, que contenían abundantes fragmentos, muy diversos, de estos materiales. De allí procedía la mayoría de las muestras estudiadas por los investigadores de comienzos del siglo XX.

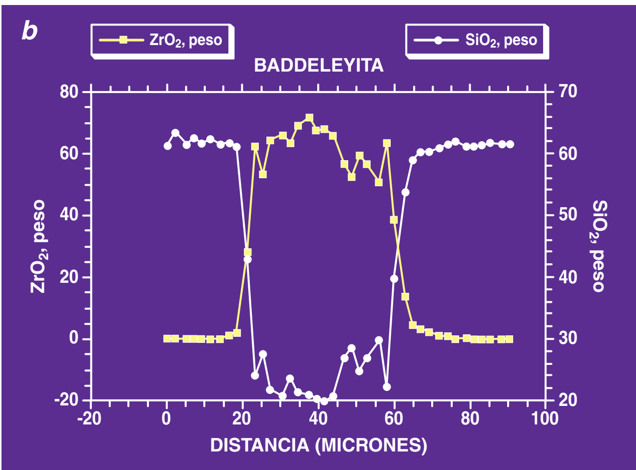
En las secciones sedimentarias aflorantes en Chapadmalal, los estudios estratigráficos acometidos por Zárate en los años ochenta demostraron la existencia de un conspicuo nivel de escorias en los depósitos pliocenos, que podía seguirse por unos 8 km a lo largo de unos 30 km del frente de acantilados. El nivel de escorias se identifica con facilidad en los afloramientos. Junto con los fragmentos mayores aparecen otros de pequeñas dimensiones, a veces no superiores al centímetro; asociados a ellos se distinguen fragmentos de tierras cocidas con ejemplares en los que se pasa transicionalmente de uno a otro. En este nivel dominan los de tamaños comprendidos entre 0,2 y 25 cm de escorias, a veces agrupados o repartidos en un espesor de unos 70 cm a 1 metro de sedimento. Los fragmentos de tierras cocidas son mucho menos numerosos y de tamaños entre 1 cm y 6 cm.

Desde una perspectiva estratigráfica, por encima y por debajo de este nivel suelen encontrarse fragmentos de escorias y tierras cocidas. Se alojan en los rellenos sedimentarios de cuevas de roedores fósiles, como las del género *Actenomys*, a profundidades de hasta 6 metros con respecto al nivel de las escorias, o bien forman parte de los depósitos de canales fluviales posteriores del Pleistoceno tardío, muy recientes pues.

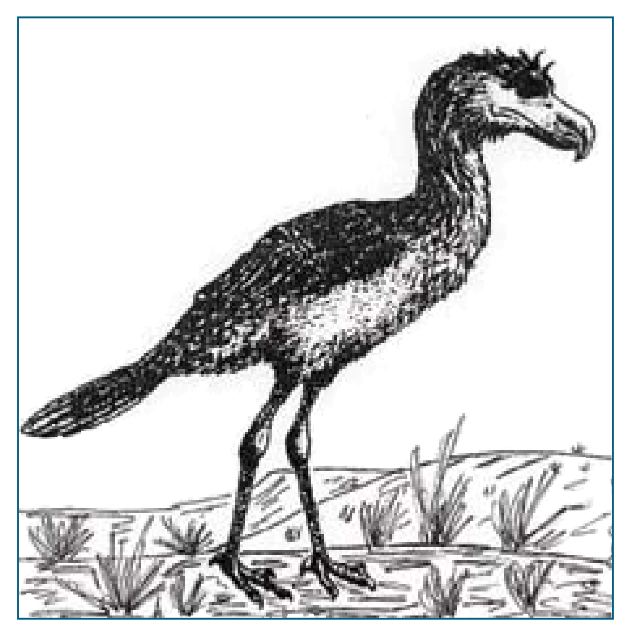
En los afloramientos de Chapadmalal recolectamos ejemplares de escorias plegadas, retorcidas y rodeadas por una zona de loess quemada, correspondiente a las tierras cocidas. Se procedió al análisis químico de las muestras y al estudio microscópico de cortes delgados. Comparamos los resultados con los obtenidos de ejemplares de loess mezclado con materia orgánica y fundido en hornos a altas temperaturas; se cotejaron también con muestras de fulguritas, materiales vítreos originados por la caída de rayos en sedimentos, por cuya razón obtienen una apariencia general parecida a la de las escorias.

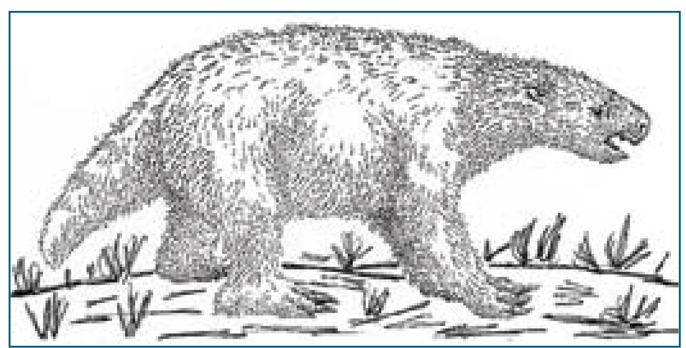
Los incendios de pastizales no podían generar temperaturas capaces de fundir el loess ni producir escorias, pero sí originar formas similares a las tierras cocidas. Las

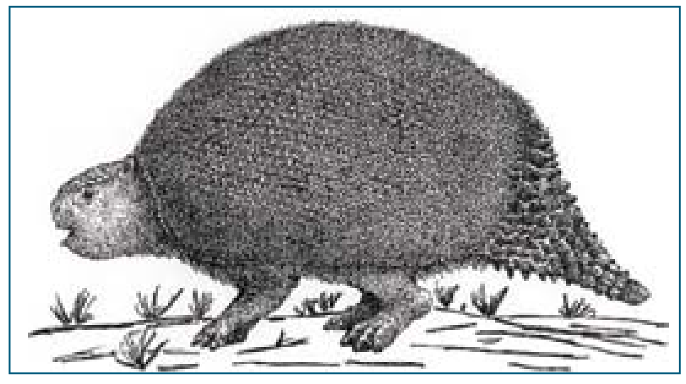




7. EN ALGUNAS MUESTRAS encontramos inclusiones de zircón ($ZrSiO_4$) que se ha transformado en glóbulos de baddeleyita (zircón monoclínico) con sílice intersticial (*a*). Se analizaron con microsonda (*b*). La descomposición del zircón en baddeleyita y sílice tiene lugar a temperaturas de entre 1720ºC y 1900ºC. La presencia de este mineral constituye uno de los indicadores clave de un proceso de impacto.







8. LA FAUNA SUDAMERICANA alcanzó un alto grado de endemismo. Durante la mayor parte del Terciario, evolucionó en un aislamiento casi completo. Había aves corredoras como *Procariama*, un fororraco similar a *Hermosiornis* y edentados como *Glossotheridium* y *Paraglyptodon*. Junto con otros géneros se registraron por última vez en el Chapadmalalense, en cuya sección cuspidal se encuentra el nivel de escorias y tierras cocidas. La ilustración corresponde a *Glossotherium* y *Glyptodon* del Pleistoceno, similares en su aspecto a los edentados mencionados. (Gentileza de Claudia Tambuzzi y Susana Bargo).

escorias sólo se formaban a temperaturas superiores a los 1300 ºC. Además, las escorias se distinguían de las fulguritas por su gran tamaño, la situación estratigráfica restringida a un nivel definido, la presencia de estructuras que indicaban en algunas escorias un proceso de emplazamiento dinámico y la geoquímica de ciertos ejemplares que diferían de la composición media del loess.

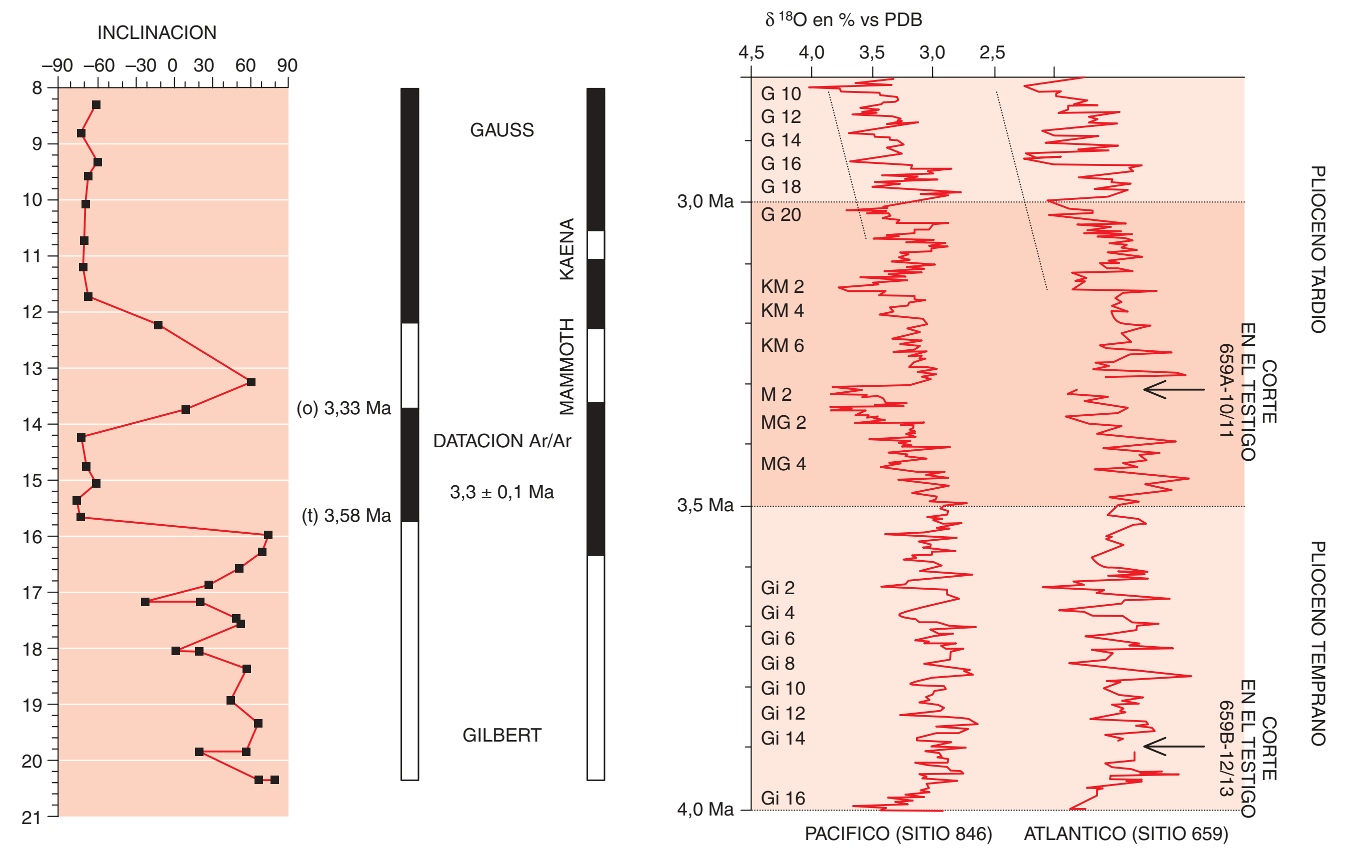
En los cortes delgados efectuados para análisis microscópicos de las escorias de Chapadmalal, el vidrio intersticial presentaba una serie de peculiaridades. Por un lado contenía una serie de segregaciones a las que se da el nombre de *schlieren*, con inclusiones minerales y propiedades ópticas típicas del vidrio enfriado rápidamente. Por otro lado, en la matriz vítrea de las escorias aparecían agrupamientos de baddeleyita, producto de la ruptura del zircón ($ZrSiO_4$) en ZrO_2 monoclínico (la baddeleyita) y sílice, como resultado de temperaturas transitorias altas, de entre 1720 ºC y 1900 ºC. También encontramos clastos, minerales descompuestos térmicamente, y vesículas deformadas.

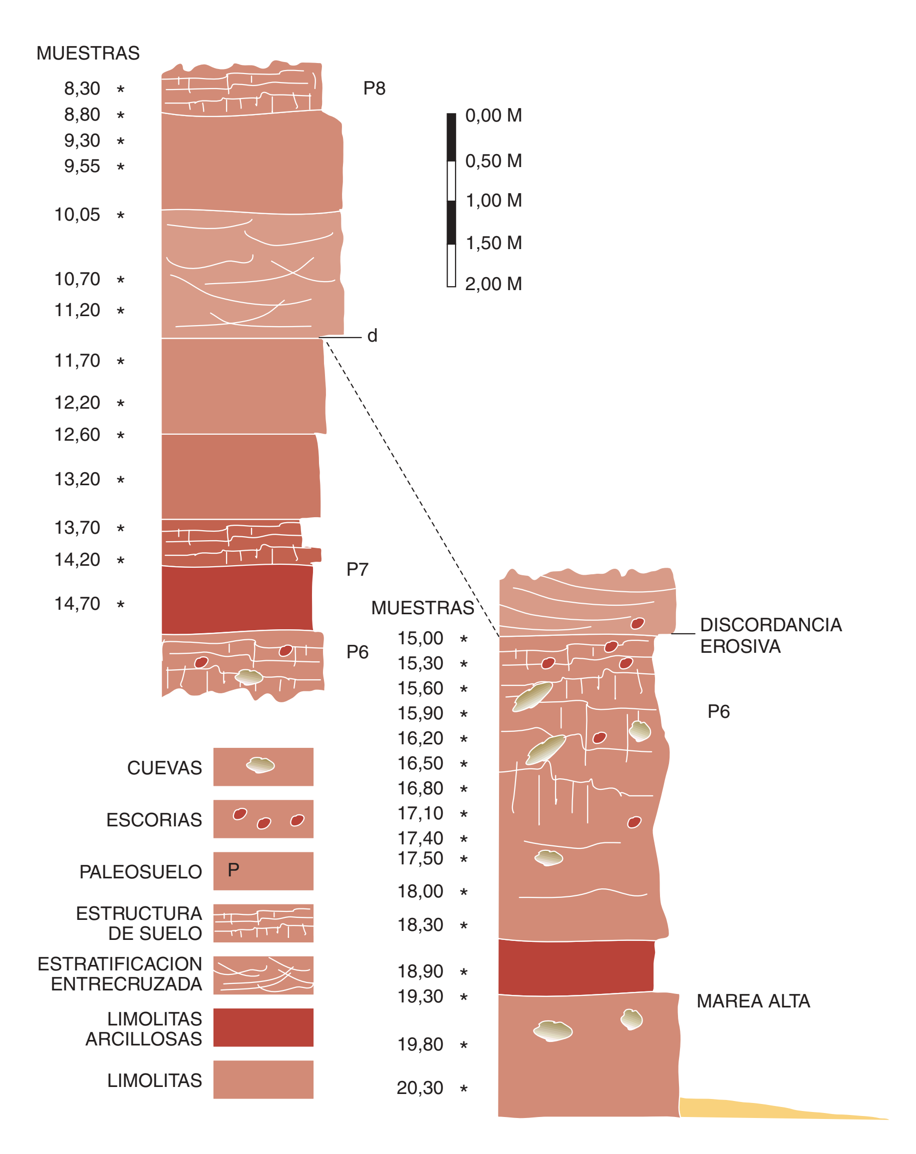
La serie de características microscópicas y químicas, así como la distribución estratigráfica de las escorias, nos movieron a interpretarlas como materiales sedimentarios sometidos a altísimas temperaturas transitorias y parcialmente fundidos debidos a un impacto y eyectados hacia áreas circundantes, es decir, impactitas. Entre las pruebas reunidas, la presencia de baddeleyita se considera un criterio sólido para avalar la existencia de un proceso de impacto. En 1965, El Goresy señaló que la baddeleyita en vidrios originados por impacto constituía un indicador de temperaturas de fusión muy altas en las rocas que contienen el mineral zircón.

Los análisis químicos de las escorias y tierras cocidas revelaron que la composición de los elementos mayoritarios guardaba coherencia con la de los sedimentos loessoides de Chapadmalal. Por un lado permitieron descartar una fuente volcánica potencial en profundidad. Por otro, diferían de la composición de las escorias de Río Cuarto. A diferencia de las escorias de Río Cuarto, las de Chapadmalal contienen elevadas concentraciones de K_2O y Na_2O. Tales concentraciones insólitas sugerían que las escorias no sólo derivaron de los sedimentos loessoides, sino también de arcillas marinas que subyacen a aquellos depósitos en las cercanías. Algunas muestras contenían niveles significativamente elevados de Cr y Ni, procedentes seguramente del cuerpo de impacto.

Para determinar la edad de las escorias de Chapadmalal, recurrimos a técnicas radiométricas de datación. La establecimos en 3,3 millones de años, período que encajaba con el acotamiento temporal estimado para el nivel estratigráfico, basado en los resultados de un perfil magnetoestratigráfico que incluye el nivel de las escorias, y con la correlación con las edades asignadas a las asociaciones faunísticas. Por consiguiente, el episodio de formación de las escorias y tierras cocidas se ubicaba antes del comienzo del subcrón paleomagnético Mammoth.

Hay varias coincidencias dignas de destacar a propósito de la relación entre posición estratigráfica





9. LA DATACION CRONOLOGICA del nivel de las escorias (*a*) se efectuó a través de técnicas radiométricas y de medición del paleomagnetismo de los sedimentos superiores e inferiores. El episodio de impacto ocurrió hace 3,3 millones de años, con anterioridad al subcrón paleomagnético Mammoth. Coincidió ese período con una variación importante en las relaciones de los isótopos de oxígeno (O^{18}/O^{16}), medidas en las conchillas de foraminíferos de testigos marinos que sugieren un descenso general de la temperatura (*b*). La continuación de los estudios nos permitirá determinar si se trató de una simple coincidencia o si bien existió una relación de causa-efecto.

y edad del nivel de escorias y tierras cocidas, por un lado, y ciertos acontecimientos paleobiológicos y ambientales ocurridos entonces, por otro. En primer lugar, los estudios paleontológicos llevados a cabo por Eduardo Tonni y colaboradores en 1992 señalaron un importante cambio faunístico, cuya exacta posición cronológica no fue bien ajustada y que se ubicaron en el Plioceno medio, registrado entre la unidad estratigráfica que contiene las escorias, correspondiente al piso edad



10. LA DISTRIBUCION DE LOS CRATERES DE IMPACTO en la superficie de la Tierra muestra diferencias significativas, si se comparan los distintos continentes. El mayor número de cráteres se ha encontrado en América del Norte, Escandinavia y Australia, mientras apenas se han reseñado en Sudamérica y Africa. Estas diferencias no se deben a que haya regiones más propensas que otras a recibir impactos, sino al número de investigaciones llevadas a cabo en cada una de ellas, la densidad de población y la geología de cada región, que determinan la conservación de las estructuras sometidas a la acción erosiva a lo largo del tiempo.



11. POR SIMULACION NUMERICA y experimentos de laboratorio podemos recrear la cantidad de impactos y el funcionamiento de los procesos. Se reproduce aquí la pluma de material vaporizado que se formó luego de que un proyectil pequeño procedente de la derecha y a una velocidad de 6 km por segundo impactara en la arena. A partir de estos experimentos, modificando los materiales utilizados, la velocidad de los proyectiles disparados y el ángulo de impacto, puede investigarse la morfología de los cráteres resultantes y la trayectoria de los productos de eyección.

Chapadmalalense, y la unidad suprayacente, perteneciente al piso edad Marplatense.

Para estos investigadores representó el episodio de extinción más significativo de la secuencia de Chapadmalal. Durante el piso Chapadmalalense, en cuya cúspide se encuentran las escorias, se producía el último registro de 36 géneros y sólo aparecían tres nuevos géneros. Este cambio faunístico supuso la extinción de un importante número de géneros y especies endémicas. Afectó, entre otros, a la familias Glyptodontidae, Mylodontidae, Dasipodidae, un carnívoro marsupial, el litopterno *Brachitherium* y el toxodóntido *Xotodon*. En el Chapadmalalense también se produce el último registro de las cariámides, aves corredoras de hábitos carnívoros del terciario sudamericano. Con posterioridad al episodio de las escorias no vuelven a aparecer familias endémicas.

Además, cuando comparamos las edades radiométricas obtenidas y el perfil paleomagnético de la sección de escorias con los testigos sedimentarios de los fondos marinos, el episodio de las escorias coincidía con variaciones repentinas en el registro de isótopos estables de oxígeno, que revelaban fuertes variaciones climáticas. Hace unos 3,3 millones de años, se produjo un enfriamiento de unos 2 ºC, en las aguas del fondo del Atlántico combinado con una glaciación leve, según se infiere de un máximo en los valores del isótopo O^{18}. Los análisis de isótopos de oxígeno de los testigos obtenidos de sitios del Pacífico y del Atlántico han determinado que este episodio consistió en dos fluctuaciones isotópicas, bien definidas, cuyos inicios se fijan en 3,35 y 3,3 millones de años. La primera de estas fluctuaciones comienza antes del subcrón Mammoth en ambos sitios, en buena correlación con la edad paleomagnética del nivel de escorias.

Otra coincidencia llamativa es el notable cambio en el paisaje que ocurre con posterioridad al acontecimiento de las escorias. Valles anchos de hasta 15 km y otros más estrechos y profundos aparecen excavados en el sustrato representado por los depósitos del Chapadmalalense portadores de las escorias; crean un relieve especial en el paisaje suavemente ondulado de colinas del Plioceno medio. Las unidades sedimentarias posteriores rellenaron esos valles y, en algunos lugares, redepositaron las escorias. Se ignora cuál fue el agente causante de semejante modificación del paisaje.

Si resumimos los acontecimientos paleobiológicos y paleoambientales, resulta evidente una profunda reorganización del ambiente en el sur de las pampas argentinas durante el Plioceno medio. Aunque se ha atribuido su causa a los cambios climáticos, éstos serían en realidad consecuencias de otro

factor, hoy por hoy desconocido. De ahí el interés de la coincidencia temporal del episodio que generó las escorias y tierras cocidas, que asociamos al impacto de un asteroide en el Plioceno medio.

La caída de ese cuerpo celeste podría haber provocado una extinción faunística regional o bien haber desencadenado drásticos cambios ambientales que arrasaron los ecosistemas pampeanos. La modificación repentina del clima y la circulación oceánica registrada por las variaciones isotópicas quizás encuentren también su origen en el impacto generador de las escorias y tierras cocidas. Y tal vez podría haber desencadenado los cambios del paisaje registrados en la secuencia de Chapadmalal.

¿Dónde está el cráter del impacto del que procederían las escorias y tierras cocidas? El tamaño de los fragmentos mayores, de dos metros de longitud, coincide con el de los fragmentos recolectados en otras estructuras de impacto. En el cráter del Ries de 24 km de diámetro, del sur de Alemania, se han encontrado bombas suevíticas, que son fragmentos eyectados de impactitas, de hasta 0,5 metros de diámetro. En el cráter de Zhamanshin de 14 km de diámetro y en el cráter de 18 km de diámetro de El'gygytgyan, ambos en Rusia, se hallaron bombas de 1 y 2 metros, respectivamente. A tenor del tamaño de las escorias encontradas en Chapadmalal, cabe inferir un tamaño similar para el cráter de impacto del Plioceno medio. Podría estar ubicado en la zona de la plataforma marina actual, aunque la expresión superficial de cualquier estructura cercana a la costa o en la plataforma habría sido borrada por la erosión marina que durante el Pleistoceno ha hecho retroceder la línea de costa varios kilómetros.

Si partimos del número de cráteres de la superficie lunar, de la cantidad de impactos registrados en áreas cratónicas estables de América del Norte y de la probabilidad actual del número de objetos en el espacio como asteroides, meteoritos y cometas que cruzan la órbita de la Tierra, podrían haberse producido entre 2 y 6 episodios de impacto que generaron cráteres de más de 1 km de diámetro durante los últimos 12 millones de años, en un área de alrededor de un millón de kilómetros cuadrados de la región chaco-pampeana. Se trata de una estimación de sumo interés, pues hay noticias de la presencia de escorias en otras localidades de la región pampeana del sur de Buenos Aires, además de la clásica localidad de Mar del Plata-Miramar.

Hemos visitado y explorado estos lugares. De acuerdo con los primeros resultados en cuanto a sus edades y ubicaciones estratigráficas, se trataría de niveles de escorias relacionados con episodios de impacto. Esa observación abre enormes expectativas sobre la potencialidad de la Pampa como región archivo de episodios de impacto. De momento habría, por lo menos, cuatro episodios, que convierten a la región en un registro continental de características únicas para este tipo de procesos. El estudio de escorias y tierras cocidas, que requiere la colaboración de la sedimentología, geocronología, magnetoestratigrafía, mecanismos de impacto, paleontología y petrología, ayudará a interpretar la historia geológica desde otra perspectiva.

Bibliografía complementaria

TERRESTRIAL IMPACT: THE RECORD IN THE ROCKS. R. A. F. Grieve en *Meteoritics*, n.º 26, págs. 175-194, 1991.

RECENT GRAZING IMPACTS ON THE EARTH RECORDED IN THE RÍO CUARTO CRATER FIELD, ARGENTINA. P. H. Schultz y R. Lianza en *Nature*, vol. 355, págs. 234-237, 1992.

METEORITE CRATERS AND IMPACT STRUCTURES OF THE EARTH. P. W. Hodge. Cambridge University Press, 1994.

A 3.3-MA IMPACT IN ARGENTINA AND POSSIBLE CONSEQUENCES. P. H. Schultz, M. Zárate, W. Hames, C. Camilión, J. King en *Science*, vol. 282, págs. 2061-2063, 1998.

TRACES OF CATASTROPHE. A HANDBOOK OF SHOCK-METAMORPHIC EFFECTS IN TERRESTRIAL METEORITE IMPACT STRUCTURES. B. M. French, LPI Contribution N. 954. Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 págs. (1998).

La extinción de las especies

Ignoradas en general por los políticos, las advertencias de los ecólogos sobre la actual extinción en masa se reciben con escepticismo en determinados círculos. Resulta harto difícil conocer las dimensiones de la mortandad, la naturaleza de su alcance y la forma de detenerla

W. Wayt Gibbs

Sobre el estado de ánimo de los profesionales de la ecología constituye un buen punto de referencia la convención anual de la Sociedad para la Biología de la Conservación. En la última, celebrada en agosto del año pasado en Hilo, Hawai, Robert M. May, profesor de la Universidad de Oxford y presidente de la Regia Sociedad, se encargó de disipar cualquier atisbo de esperanza. De acuerdo con sus cálculos, la tasa de extinción (el ritmo al que las especies desaparecen) se aceleró durante los últimos 100 años; se ha multiplicado por 1000 la tasa que se supone había antes de que aparecieran los seres humanos. Varias líneas de razonamiento sugieren, explicó, una aceleración por un factor de 10 a lo largo del próximo siglo, lo que nos coloca en el frente de la sexta ola de extinción en masa de los organismos.

May se lamentó del "chauvinismo de vertebrados total", en que han caído biólogos y conservacionistas. El sesgo hacia los mamíferos, las aves y los peces impide predecir de manera fiable el alcance y las consecuencias de la pérdida de biodiversidad, cuya mayor parte reside en otros grupos. En la orilla opuesta milita el estadístico Bjørn Lomborg, de la Universidad de Århus, para quien los informes sobre la muerte de la biodiversidad se han exagerado mucho.

Cifras y proyecciones

La rotunda afirmación de May de que el hombre parece estar causando un cataclismo biológico mayor que cualquier otro episodio de extinción en masa desde el que acabó con los dinosaurios, hace 65 millones de años, se une a un coro de voces de alerta que se ha venido oyendo, por lo menos, desde 1979, cuando Norman Myers estimó que, cada año, unas 40.000 especies pierden a su último miembro, y predijo, para el año 2000, la extinción de un millón de ellas. En el decenio de los ochenta, Thomas Lovejoy cifraba las bajas, para ese plazo, entre el 15 y el 20 por ciento de las especies; Paul Ehrlich elevaba a la mitad del total las especies desaparecidas en el año 2000. Pero tras su reciente revisión de la bibliografía sobre tasas de extinción, Kirk O. Winemiller, ictiólogo de la Universidad de Texas A&M, concluye que la eliminación no llega a una quinta parte del elenco.

Las últimas proyecciones recortan incluso esa cifra, porque algunas de las especies que se suponían a extinguir han persistido durante más tiempo del previsto. Y no faltan las que han vuelto de la tumba. Hace unos meses se ha descubierto que el topillo bávaro, mamífero de Eurasia continental que se creía extinguido desde 1500, sigue vivo.

Con todo, los números varían. En la edición de 1999 de *The Diversity of Life*, E. O. Wilson, de la Universidad de Harvard, cita estimas actuales según las cuales entre el 1 y el 10 por ciento de especies se extinguen en un decenio, al menos 27.000 por año. Michael J. Novacek, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York (AMNH), revisaba en marzo del año pasado el estado de la cuestión y llegaba a la conclusión de que las cifras que se aproximan al 30 por ciento de exterminación de todas las especies para mediados del siglo XXI no resultan inverosímiles. Y en una encuesta realizada en 1998 entre la comunidad de biólogos, el 70 por ciento creía que está teniendo lugar una extinción en masa; de éstos, un tercio admitía que se perdería entre el 20 y el 50 por ciento de las especies en los 30 años siguientes.

Lomborg insiste, sin embargo, en que tales suposiciones carecen de respaldo suficiente. En su opinión, los conservacionistas han ignorado pruebas recientes según las cuales la deforestación tropical no se está cobrando el peaje temido. A ese recelo se suma Ross D. E. MacPhee, del AMNH, para quien no existe un solo grupo de animales bien investigados que muestre una pauta de pérdidas que se corresponda con tasas de extinción muy altas. Los mejores modelos, sugiere Lomborg, proyectan una tasa de extinción del 0,15 por ciento de especies por decenio, lo que no es una catástrofe, aunque sí un problema.

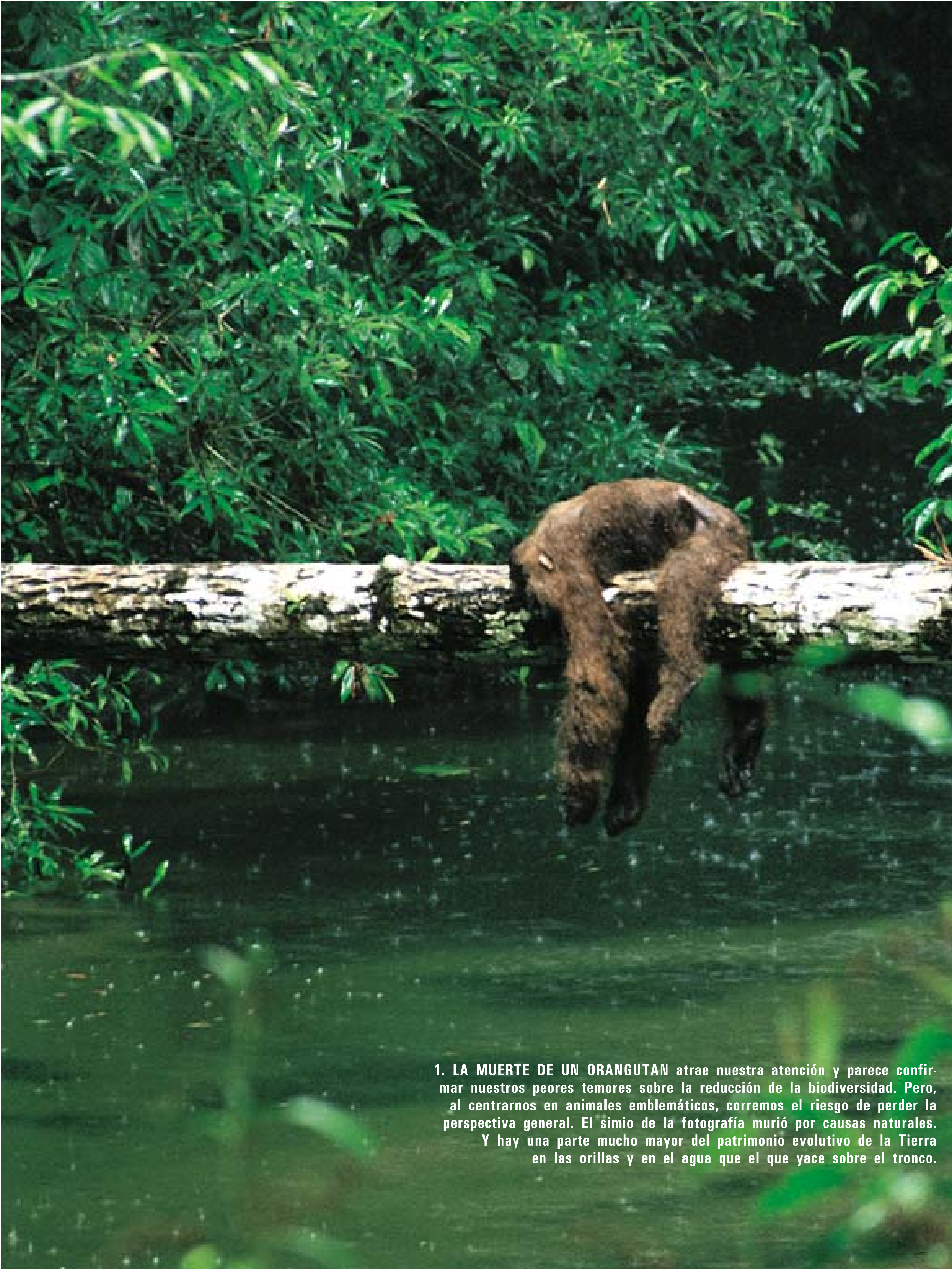
Pese a la disparidad de las cifras, la pregunta continúa abierta. ¿Nos hallamos ante un episodio de extinción en masa? Para contestarla se impone conocer tres factores: la tasa de extinción natural (o de fondo), la tasa actual y la estabilidad o inestabilidad (cambio) del ritmo de la extinción. El primer paso consiste en averiguar la duración media de la vida de una especie a partir del registro fósil. Para Wilson, la tasa de extinción de fondo será, entonces, el inverso de aquélla; si las especies nacen al azar y viven un millón de años, ello significa que una especie entre un millón se extingue de manera natural cada año. En 1995 May empleó un método similar para computar la tasa de extinción de fondo; pero al fundarse en estimas que situaban la duración media de la vida de una especie entre cinco y 10 millones de años, obtuvo una tasa que es entre cinco y 10 veces menor que la de Wilson.

Sesgos y supuestos

May y Wilson se apoyaban en datos elaborados por David M. Raup. Este paleontólogo vio, sin embargo, graves defectos en las hipótesis de los dos primeros que, a su entender, partían de tres supuestos falsos. Primero, aceptar que las especies de plantas, mamíferos, insectos, invertebrados marinos y otros grupos perduran aproximadamente el mismo tiempo; en realidad, el tiempo de supervivencia típico parece variar entre los distintos grupos por un factor de 10 o más, siendo las especies de mamíferos las que antes se extinguen. En segundo lugar, May y Wilson conceden a todos los organismos la misma probabilidad de aparecer en el registro fósil, en tanto que la paleontología reconoce que no llegan al 4 por ciento las especies extintas que fosilizan; además, las especies que vemos son las que gozaron de una amplia dispersión y notable éxito. Las especies débiles, confinadas en cimas montañosas o a una isla, se extinguieron todas antes de poder fosilizarse, apostilla

Resumen/Tasas de extinción

- Los ecólogos advierten que el hombre está provocando un episodio de extinción en masa de una gravedad similar a la que determinó la desaparición de los dinosaurios, hace 65 millones de años. Sin embargo, desde la paleontología y la estadística se pone sordina a tales augurios.
- Es difícil saber con qué rapidez están desapareciendo las especies. Los modelos basados en la velocidad de la deforestación tropical o en el crecimiento de las listas de especies amenazadas predicen tasas de extinción crecientes. Pero el sesgo de los biólogos hacia las plantas y los vertebrados, que representan una minoría de los seres vivos, socava dichas predicciones. Puesto que el 90 por ciento de las especies no tienen todavía nombre, y mucho menos censos, son imposibles de verificar.
- Frente a la inseguridad sobre la reducción de la biodiversidad y su valor económico, se debate si las especies raras debieran ser el foco de la conservación. Quizá, sugieren algunos, deberíamos primero intentar salvar tierras vírgenes (y baratas), donde la evolución pueda proseguir sin verse afectada por la actividad humana.



1. LA MUERTE DE UN ORANGUTAN atrae nuestra atención y parece confirmar nuestros peores temores sobre la reducción de la biodiversidad. Pero, al centrarnos en animales emblemáticos, corremos el riesgo de perder la perspectiva general. El simio de la fotografía murió por causas naturales. Y hay una parte mucho mayor del patrimonio evolutivo de la Tierra en las orillas y en el agua que el que yace sobre el tronco.

John Alroy, de la Universidad de California en Santa Bárbara (UCSB).

El tercer problema es de orden estadístico. May y Wilson utilizan una duración promedio de la vida, cuando, en opinión de Raup, hay que recurrir a una mediana, pues la inmensa mayoría de las especies son de vida corta y, por tanto, la media queda distorsionada por las poquísimas que tienen una duración media de la vida muy larga. Estas tres simplificaciones excesivas, resume el paleontólogo, subvaloran la tasa de fondo y hacen que la situación actual resulte, en comparación, más alarmante.

En un primer intento de corregir los sesgos y precariedad de los datos, Helen M. Regan y sus colaboradores de la UCSB publicaron sus resultados limitados a los mamíferos: cuántas especies vivas y cuántas de extinción reciente fosilizarían. Estimaron la incertidumbre asociada a uno y otro grupo, sin dejar margen a meras conjeturas. De acuerdo con esa investigación, la tasa actual de extinción de los mamíferos se sitúa entre 17 y 377 veces la tasa de extinción de fondo; el valor más aproximado se halla en la horquilla entre 36 y 78 veces.

Sin embargo, el método de Regan tiene su punto débil, que ella misma reconoce: la comparación de los últimos 400 años con los 65 millones de años anteriores implica, de manera inevitable, que la tasa actual de extinción se mantendrá durante millones de años. Siguiendo otro método más depurado, Alroy establece que la tasa de pérdida entre las especies de mamíferos ha sido unas 120 veces mayor que la natural.

Extinción en marcha

Los trabajos dedicados a conocer la tasa de extinción actual se desenvuelven con mayor inseguridad incluso. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) elabora “listas rojas” de organismos que se sospecha han desaparecido de su medio natural. Pero en la tarea, objetan algunos, no sigue unos criterios de fiabilidad rigurosos. MacPhee y otros expertos en extinción han formado un comité sobre organismos recientemente extinguidos, que ha sometido a criba las listas rojas: aunque de los 87 mamíferos listados por la IUCN, 60 se han extinguido, de los 92 peces de agua dulce supuestamente extinguidos según la IUCN sólo 33 han desaparecido para siempre.

Ahora bien, por cada especie reputada extinta sin razón, podría haber cientos o miles que desaparecen sin que la ciencia lo sepa. May lo cuantifica. La posibilidad de error en torno al número de especies con las que compartimos el planeta se cifra en un factor de 10, es decir, unos siete millones de especies, aunque se barajan estimaciones entre los cinco y los 15 millones, excluidos los microorganismos.

Los taxónomos han dado nombre a alrededor de 1,8 millones de especies. De la mayoría no sabemos casi nada; en particular, de los insectos, nemátodos y crustáceos, que dominan el reino animal. Alrededor del 40 por ciento de las 400.000 especies de coleópteros registradas se han recolectado en un solo lugar por especie. Sin conocer el área de distribución, no podemos confirmar su extinción. Ni siquiera suele llevarse un registro de los propios invertebrados que se sabe que se han extinguido; a modo de ejemplo, cuando desapareció la paloma migratoria en 1914, se llevó consigo dos especies de piojos parásitos. Siguen sin estar en la lista de la IUCN.

Sin duda, resulta harto difícil asistir a la extinción de una especie. Los artículos relativos al “holocausto biótico”, si aceptamos la metáfora de Myers, dan por supuesto que el grueso de las extinciones se produce en la América tropical. Pensemos en los peces de agua dulce, de reconocida vulnerabilidad. Una cuarta parte de ellos se encuentran en la lista de especies amenazadas. Con todo, Winemiller, que trabaja desde hace 30 años en Venezuela, país que posee más peces de agua dulce que toda Norteamérica, y ha realizado una meritoria labor de catalogación de la diversidad de peces, se ha visto incapaz de ofrecer un solo caso documentado de extinción.

La lógica de la pérdida

Pero el desastre está ahí. Se infiere de varias líneas de pruebas que evocan unas tasas de extinción aceleradas. De entre los criterios aceptados sobresale la relación especies-área. Hace más de 30 años Wilson proponía que a medida que se reduce la superficie del hábitat, el número de especies que viven en éste disminuye proporcionalmente, entre la raíz cúbica y la raíz sexta. De ese caso general sitúa el valor medio en la raíz cuarta, lo que significa que, cuando se elimina el 90 por ciento del hábitat, el número de especies se reduce a la mitad.

A partir de esta primera estima aproximada y de la tasa de destrucción de la selva tropical, en torno al 1 por ciento anual, continúa Wilson, podemos predecir que alrededor de la cuarta parte de un 1 por

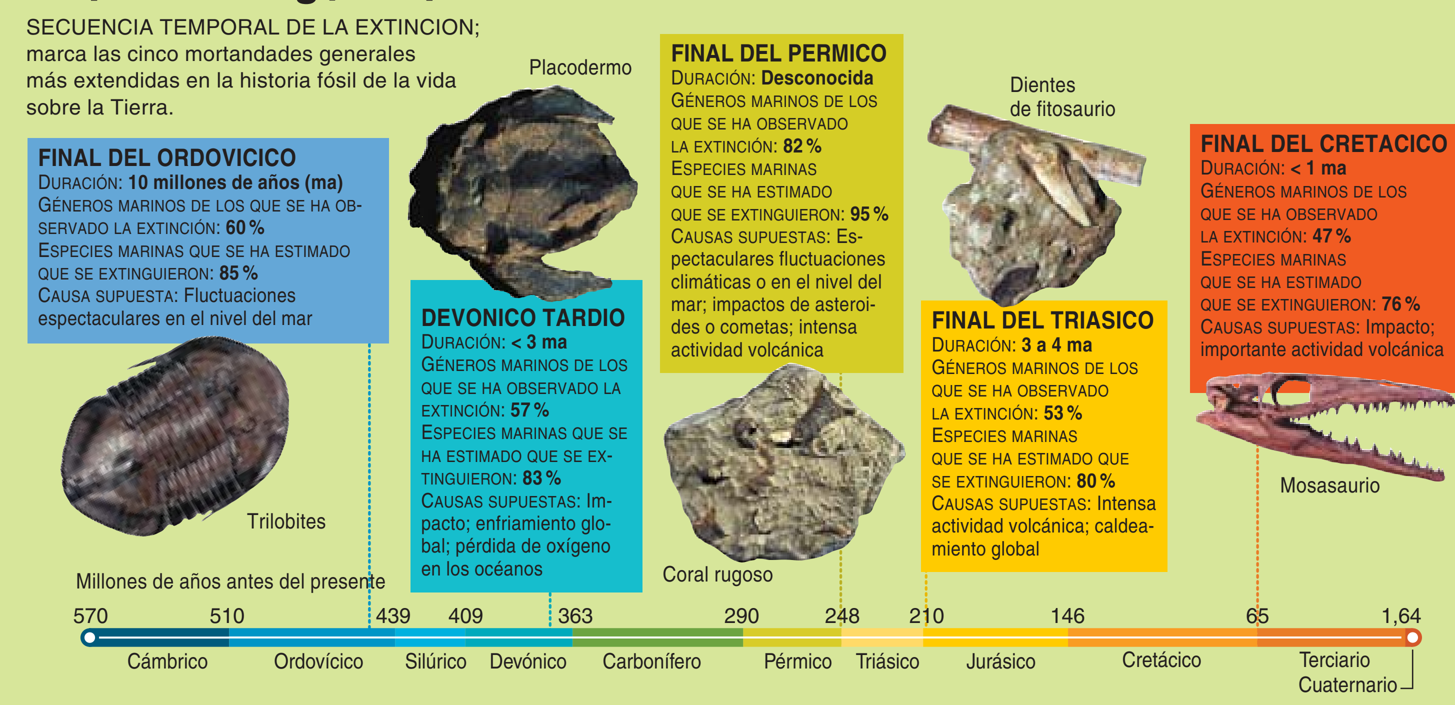
Filtros de extinción

La supervivencia del más apto adquiere un nuevo significado cuando el hombre coloniza una región. De cuatro regiones de clima mediterráneo, las desarrolladas más recientemente han perdido fracciones mayores de sus especies de plantas vasculares. Una vez las especies menos compatibles con la agricultura son eliminadas por el filtro de la “selección artificial”, las tasas de extinción parecen reducirse.

REGION (por orden de desarrollo)	**EXTINGUIDAS** (por 1000)	**AMENAZADAS** (porcentaje)
Mediterráneo	**1,3**	**14,7**
El Cabo (Sudáfrica)	**3,0**	**15,2**
California	**4,0**	**10,2**
Australia Occidental	**6,6**	**17,5**

FUENTE: “Extinctions in Mediterranean Areas”, Werner Greuter en Extinction Rates, *dirigido por J. H. Lawton y R. H. May. Oxford University Press, 1995*

El pasado (¿y el presente?) de las extinciones en masa



Como sea que se sospecha que más de 1100 especies (*ocho de ellas se indican a la derecha*) han desaparecido en los últimos 500 años, los ecólogos temen la inminencia de un episodio (el sexto) de extinción en masa. Sin embargo, las mortandades que ha habido hasta ahora no dejarían ninguna señal insólita para los paleontólogos del futuro que inspeccionaran nuestra época.

ESPECIE (*Nombre científico*)	**VISTA POR ULTIMA VEZ EN**	**CAUSAS DE LA EXTINCION**
Corégono de fondo (*Coregonus johannae*)	1952, lagos Hurón y Michigan	Sobrepesca, hibridación
Pez cachorrito (*Cyprinodon ceciliae*)	1988, presa Ojo de Agua, México	Pérdida de alimento
Zorro volador de dorso desnudo de Chapman (*Dobsonia chapmani*)	Década de 1970, isla de Cebú, Filipinas	Destrucción del bosque, sobrecaza
Foca monje del Caribe (*Monachus tropicalis*)	Década de 1950, mar Caribe	Sobrecaza, acosamiento
Picoancho de Guam (*Myiagra freycineti*)	1983, isla de Guam	Depredación por serpientes arborícolas pardas introducidas
O'o de Kauai (*Moho braccatus*)	1987, isla de Kauai, Hawai	Enfermedades, depredación por ratas
Mariposa azul de Xerces (*Glaucopsyche xerces*)	1941, península de San Francisco	Transformación de tierras
Frigánea de Tobias (*Hydropsyche tobiasi*)	Década de 1950, río Rin, Alemania	Contaminación industrial y urbana

Fuentes: Comité sobre Organismos Recientemente Extinguidos; BirdLife International; Sociedad Xerces; World Wildlife Fund.

ciento de especies se están ahora extinguiendo o se hallan condenadas a desaparecer mucho antes de lo que les correspondería. De un conjunto de 10 millones de especies deberíamos esperar que desaparecieran cada año unas 25.000.

Lomborg no participa de esa opinión. Por tres razones. Las relaciones especies-área se establecieron comparando el número de especies en las islas; no tienen por qué ser de aplicación necesaria en hábitats continentales fragmentados. A este respecto, Gretchen Daily, de la Universidad de Stanford, publicaba hace poco que más de la mitad de las especies de aves nativas de Costa Rica se encuentran en hábitats rurales, en su mayoría deforestados, junto con fracciones similares de mamíferos y mariposas. Aunque pudiera ser que no prosperasen, una gran fracción de especies forestales podría sobrevivir en tierras de labor y en parques forestales, si bien nadie sabe todavía durante cuánto tiempo.

Lomborg esgrime en segundo lugar que, lo mismo en los Estados Unidos orientales que en Puerto Rico, el desmonte de más del 98 por ciento de los bosques primarios no eliminó la mitad de las especies de aves. Y lo refuerza con unas cifras aplastantes: tras cuatro siglos de talas sólo se extinguió, de las 200 que había en los Estados Unidos, una especie de ave forestal; de las 60 especies nativas en Puerto Rico, siete.

A esos dos argumentos de Lomborg, replica Stuart L. Pimm, de la Universidad de Columbia. Le reprocha que haga un uso abusivo de la teoría de la relación especies-área. Para Pimm sólo las especies confinadas a la zona afectada desaparecen, no las que gozan de una distribución más amplia. Salvo 28, las 200 especies de aves que medran en los bosques de los EE.UU. orientales vivían también en otros lugares. Además, el bosque se taló gradualmente, y gradualmente se regeneró tras el abandono de los campos. De modo que incluso en el momento álgido, alrededor de 1872, la mitad de la extensión del bosque original estaba cubierta por tierras forestadas. La teoría de la relación especies-área predice que un

El inventario de la vida

¿Cuál es el alcance real de la crisis de extinción? Depende, en buena medida, de las especies existentes. Cuanto mayor sea su número, más especies se extinguirán cada año por causas naturales y más especies nuevas aparecerán de forma asimismo natural. Ahora bien, aunque se hallan perfiladas las líneas generales del árbol de la vida, no sabemos cuántas ramitas hay exactamente al final de cada rama. Cuando se trata de bacterias, virus, protistas y arqueos (un reino entero de seres vivos unicelulares descubierto hace escasos decenios), los microbiólogos poseen sólo una vaga idea del número real de ramas.

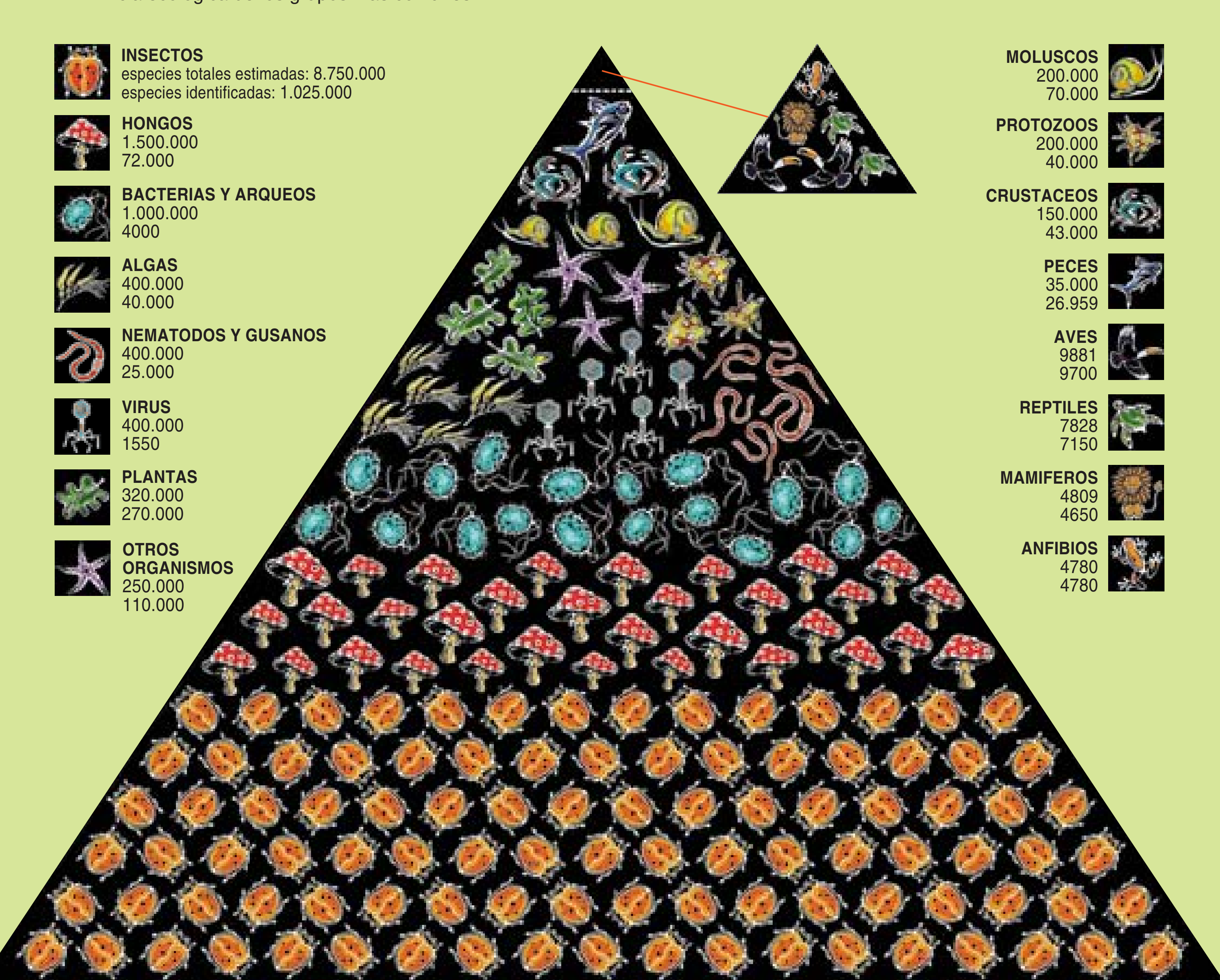
Aves, peces, mamíferos y plantas son las excepciones. Hay unos 5000 profesionales en todo el mundo dedicados a la taxonomía, con unas proporciones muy similares entre los consagrados a la identificación y catalogación de vertebrados, plantas e invertebrados. Mas, a la hora de estudiar la evolución presente y futura de los ecosistemas, descubriremos muchísimo más estudiando los microorganismos del suelo que los vertebrados emblemáticos, defiende May.

De todos los grupos, con excepción de las Aves, se están descubriendo nuevas especies a un ritmo más rápido que el que nunca hubo, gracias a varios proyectos internacionales. Así, el denominado Todas las Especies, que se propone catalogar todas y cada una, microorganismos incluidos, en un plazo de 25 años. El Servicio de Información sobre Biodiversidad Global y Especies 2000 está construyendo bases de datos en Internet con registros dispersos por museos y universidades del mundo.

PIRAMIDE DE LA DIVERSIDAD

En una primera aproximación, todas las especies pluricelulares son insectos. Los biólogos conocen todavía muy poco acerca de la verdadera diversidad y de la importancia ecológica de los grupos más comunes.

FUENTES: *Encyclopedia of Biodiversity*, dirigida por S. A. Levin; "Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities", de N. Myers *et al.* en *Nature*, vol. 403, págs. 853-858, 24 febrero 2000; William Eschemeyer (especies de peces); Marc Van Regenmartel (especies de virus); Lista Roja de la IUCN 2000.



50 por ciento de reducción debería eliminar un 16 por ciento de las especies endémicas: en este caso, cuatro especies de aves. Y cuatro especies son las que se extinguieron. Lomborg no tiene en cuenta una de estas cuatro, que quizá fuera una subespecie, y otras dos, que sucumbieron tal vez por agresiones de otro tenor.

A ello responde Lomborg. Aun cuando se mantuviera la relación especies-área, las estadísticas oficiales sugieren que la deforestación se ha ido reduciendo y ahora se encuentra muy por debajo del 1 por ciento anual. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha calculado que desde el año 1990 al 2000 la cubierta forestal del mundo ha venido reduciéndose a una tasa media anual del 0,2 por ciento (11,5 millones de hectáreas taladas, menos 2,5 millones de hectáreas de repoblación).

Pero esos datos, matiza Carlos A. Peres, de la Universidad de East Anglia, deben completarse con otros: la pérdida anual de selva fue de alrededor del 0,5 por ciento en la mayor parte de los trópicos, y allí es donde vive la mayoría de las especies raras y amenazadas. Por consiguiente, aun cuando se equivoquen alguna que otra vez con las cifras quienes hacen previsiones, se trata sólo de un asunto de escala temporal.

Un futuro incierto

Los ecólogos han ensayado otros métodos proyectivos de tasas de extinción. May y sus colaboradores partieron del movimiento de los vertebrados en el elenco de especies amenazadas de la base de datos de la IUCN, a lo largo de un período de cuatro años (dos años para las plantas), para proyectar luego esos números, muy pequeños, hacia el futuro. Llegaron a la conclusión de que las tasas de extinción aumentarán entre 12 y 55 veces en los próximos 300 años. Georgina M. Mace, de la Sociedad Zoológica de Londres, arribó a un punto similar mediante la combinación de modelos que describen las probabilidades de supervivencia de una muestra restringida de especies conocidas. Nigel E. Stork, del Museo de Historia Natural de Londres, tras hallar que la probabilidad de extinción de un ave inglesa decuplicaba la de un insecto inglés, extrapoló la razón al resto del mundo para predecir que de aquí al año 2300 se habrán extinguido entre 100.000 y 500.000 especies de insectos. Lomborg está de acuerdo con este último modelo. Fundado en él, postula que la tasa para todos los animales se mantendrá por debajo del 0,208 por ciento por década, y quizá sea inferior al 0,7 por ciento por 50 años.

No faltan razones para temer una catástrofe inminente, aun cuando la extinción en masa no hubiera empezado todavía. Debemos a Kevin Higgins, de la Universidad de Oregón, un modelo informático de una población de organismos virtuales, donde se simulan sus tasas de mutación genética, su comportamiento reproductor y sus interacciones ecológicas. Si se trata de poblaciones pequeñas, las mutaciones tienden a ser bastante benignas y respetadas por la selección natural. Ello recorta de forma espectacular su persistencia hasta la extinción. Por tanto, advierte Higgins, con la mengua de hábitats y la exterminación de las poblaciones (a una tasa de quizá 16 millones por año, según ha estimado Daily) nos encontramos ante una bomba retardada, un episodio de extinción subyacente.

¿Y qué les ocurrirá a las higueras, del género *Ficus*, el más extendido de los géneros vegetales en los trópicos, si pierden la única variedad de avispa parásita que poliniza a cada una de sus 900 especies? ¿O al 79 por ciento de árboles de la bóveda arbórea de las pluviselvas de Samoa, si los cazadores acaban con los zorros voladores de los que dependen? Muchos conservacionistas temen que los arcos de ecosistemas enteros se vengan abajo si se eliminan las especies "clave".

Una metáfora que no todos comparten, dada la redundancia que, según estudios recientes, parece darse en los ecosistemas. De esa idea participa Melodie A. McGeoch, de la Universidad de Pretoria, aunque matiza que lo redundante hoy quizá no lo sea mañana. MacPhee añade que carece de sentido pensar que la mayoría de las especies desaparecerían con presiones marginalmente mayores que las que tendrían si los seres humanos no estuvieran en escena; la evolución debería haberlas hecho resilientes, es decir, dotadas de capacidad de volver a la situación precedente a la presión.

Si no la selección natural, podría hacerlo la selección artificial, si nos atenemos al trabajo de Werner Greuter, de la Universidad Libre de Berlín, Thomas M. Brooks, de Conservation International, y otros. Greuter comparó la tasa de extinciones recientes de plantas en cuatro regiones ecológicamente similares y descubrió que la región ocupada por el hombre desde hace más tiempo, y la más perturbada (la región Mediterránea), poseía la tasa menor. Se registraban mayores tasas de extinción de plantas en California y Sudáfrica, y mucho mayores en Australia Occidental. ¿Cómo explicar esa paradoja? Para los autores, las especies no pueden coexistir con la roturación del suelo y tienden a desaparecer poco después que empiece la agricultura; las que quedan están mejor equipadas para resistir la agresión humana; por tanto, las extinciones inducidas por los seres humanos pueden reducirse a lo largo del tiempo.

Si andan en lo cierto, podrían entenderse algunas cosas. Hace milenios, nuestros antepasados de Europa, Asia y otras regiones eliminaron muchas especies. Pero quizá tengamos más tiempo del que tememos para evitar catástrofes futuras en las regiones donde el hombre formó parte del ecosistema y menos tiempo del que esperamos para evitarlas en las áreas naturales que permanecen vírgenes.

Ahorros a largo plazo

En cualquier caso, las pérdidas son inevitables, mientras la población humana no deje de crecer. En el ínterim, hemos de atravesar por ese cue-



Economía y política de la biodiversidad

En el Congreso Internacional de Entomólogos celebrado el pasado verano en Foz do Iguaçú, Ebbe Nielsen, director de la Colección Nacional Australiana de Insectos, de Canberra, reflexionó acerca de las razones por las que se ha avanzado tan poco en la protección de especies amenazadas, desde el Convenio sobre la Diversidad Biológica, firmado en Brasil, en 1992, por 178 países. En el Tercer Mundo, manifestó, los apremios económicos obligan a las naciones a vivir al día, y, mientras ésa sea la situación, no podemos esperar respaldo institucional para la biodiversidad. Es decir, a menos que les resulte más rentable respetar un bosque o un humedal que talar aquél o drenar éste para ganar suelo de cultivo, pastizal o aparcamientos.

Una barrera contra la enfermedad y el hambre

Suele aducirse a menudo que la diversidad genética contenida en las especies constituye, en último término, la materia prima de la revolución biotecnológica del mañana, así como fuente prometedora de nuevos fármacos y nuevos alimentos. Una suerte de alacena de relevo por si algo ocurriera a las 30 especies de plantas cultivadas que suministran el 90 por ciento de las calorías de la dieta humana, o a las 14 especies animales que constituyen el 90 por ciento de nuestro ganado.

De esa tesis harto repetida discrepa Robert May, para quien dentro de 20 o 30 años seguiremos fabricando fármacos a partir de las moléculas, en la línea iniciada ya por los laboratorios. Diez años atrás, Merck subvencionó con 1,14 millones de dólares a InBio, un grupo de conservación costarricense, para la búsqueda de nuevas moléculas químicas extraídas de especies de la selva tropical. Además, el contrato establecía regalías para InBio por los fármacos. Al no conseguirse ninguno, Merck canceló el contrato en 1999. Shaman Pharmaceuticals, fundada en 1989 para comercializar plantas medicinales tradicionales, llegó hasta las pruebas clínicas de última fase, pero después quebró. Por otro lado, más del 90 por ciento de las variedades conocidas de las plantas alimenticias básicas se hallan depositadas en bancos de semillas.

Servicios ecosistémicos

La verdad es que los sistemas ecológicos rinden servicios en los que apenas reparamos. No sabemos en qué medida se pueden simplificar estos ecosistemas sin alterar su funcionamiento. La prudencia dicta conservar todas las piezas, por si acaso. La economía sólo puede asignar valores a las cosas para las que hay mercados. Si fuera a desaparecer todo el petróleo, por ejemplo, podríamos cambiar a combustibles alternativos que costasen 50 dólares el barril. Pero esto no determina el precio del petróleo. Y aunque ciertos experimentos recientes sugieren que eliminar una fracción grande de especies de un área pequeña reduce su biomasa y su capacidad de absorber dióxido de carbono, ignoramos si el principio es de aplicación a ecosistemas enteros.

Un deber de gerencia responsable

Ante un conocimiento tan precario de los millones de especies que existen, y no digamos ya de los complejos papeles que cada una desempeña en el ecosistema que habita, quizá la economía no pueda venir nunca en socorro de las especies amenazadas. Habrá que pensar en otras razones que nos muevan a tomar medidas en pro de la conservación. Una especie es una obra maestra de la evolución, una entidad de millones de años de antigüedad codificada mediante cinco mil millones de letras genéticas, exquisitamente adaptada al nicho en el que vive, en palabras de Wilson. Habría que reconocer el derecho inalienable a seguir existiendo de quien tiene una historia milenaria en la naturaleza. Lo que demanda una gerencia responsable.



2. LA RIQUEZA DE LAS PLUVISELVAS, como ésta de Borneo, ha de medirse todavía en gran parte, tanto en términos biológicos como económicos.

llo de botella, en expresión de Wilson, hasta poder llegar a una época, quizá dentro de un siglo, de disminución de la población humana; para él, importa alcanzar ese momento con la máxima biodiversidad posible. Los biólogos se hallan divididos acerca de si el haz de especies emblemáticas en peligro debiera determinar la biodiversidad a mantener en dicho intervalo.

Subraya May que la idea según la cual, cuando se protege a aves y mamíferos, los demás seres vivos también salen beneficiados, no resiste un análisis minucioso. Más inteligente resulta intentar conservar la mayor cantidad de historia evolutiva. Mucho más valiosas que un panda o un rinoceronte, prosigue, son formas de vida relictas tales como el tuátara, un reptil parecido a una iguana que vive en islotes costeros de Nueva Zelanda. Quedan dos especies de tuátara de un grupo que surgió del tronco principal del árbol evolutivo de los Reptiles hace tanto tiempo que esta pareja constituye por sí sola un género, un orden y casi una subclase. Woodruff, de la Universidad de California en San Diego, va más allá al proponer salvar no tanto los productos de la evolución (determinadas especies) cuanto el proceso subyacente, la evolución misma.

Existen todavía algunas áreas donde sólo la selección natural determina qué especies triunfan y cuáles fracasan. ¿Por qué no salvar ecosistemas que funcionan y que todavía no han sido expoliados? En el escudo de Guyana residen muchas más especies que en los llamados puntos calientes. "Salvar" significaría en este contexto comprar extensiones de magnitud suficiente para acomodar ecosistemas enteros a medida que éstos se desplazan hacia el norte o hacia el sur en respuesta al clima cambiante. También significaría prohibir todos los usos humanos del suelo. No se trata de ningún imposible. Las tierras salvajes son bastante baratas, y la población de compradores potenciales ha crecido en los últimos tiempos. A finales de julio del año pasado, Perú otorgó a un grupo conservacionista la primera "concesión de conservación" del país (que esencialmente es un arrendamiento renovable por el derecho de *no* desarrollar la tierra), de 130.000 hectáreas de bosque. En la actualidad, Perú ha abierto unos 60 millones de hectáreas de sus bosques públicos a este tipo de concesiones. Y se están haciendo esfuerzos para negociar acuerdos parecidos en Guatemala y Camerún.

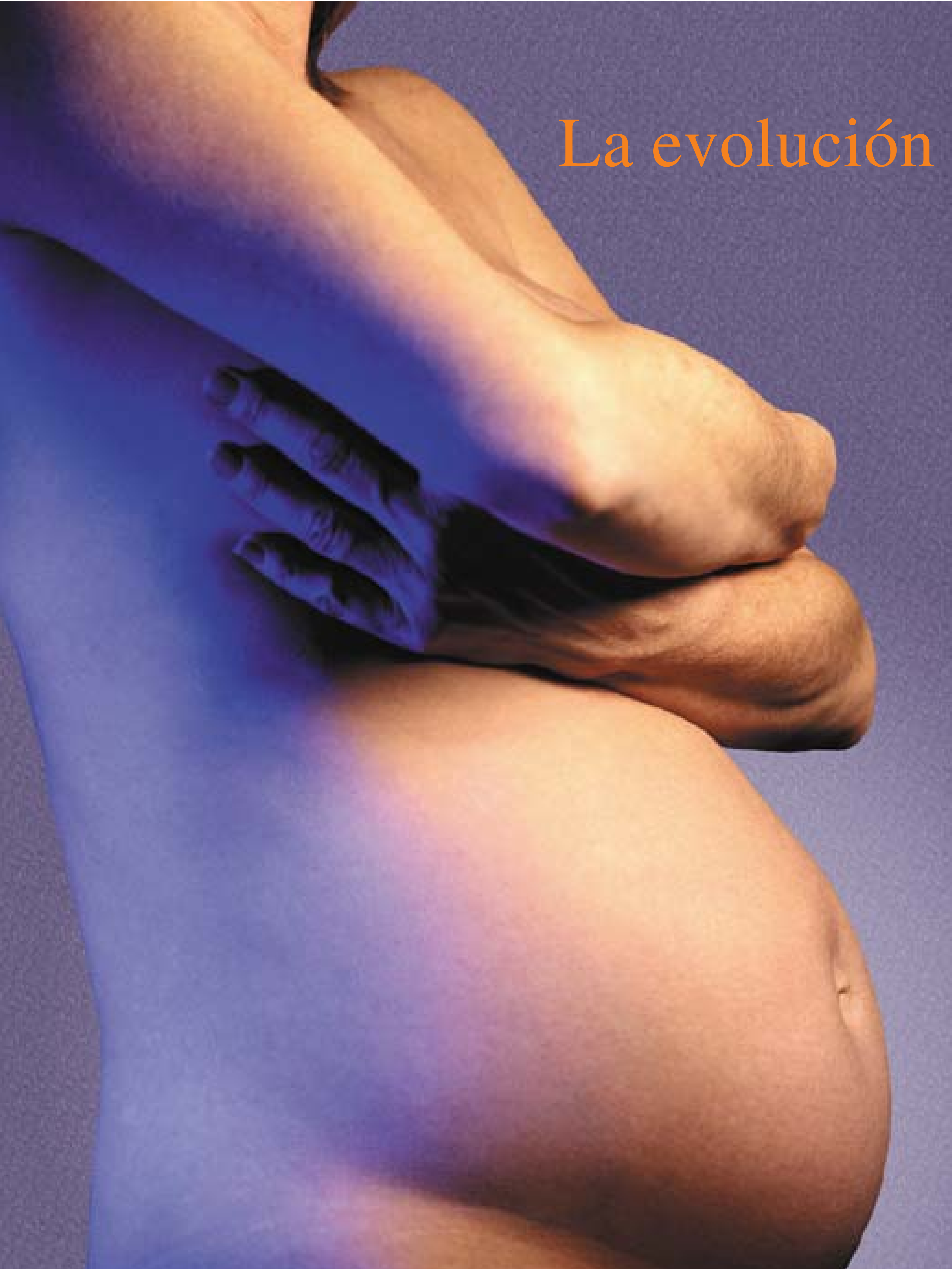
Bibliografía complementaria

THE CURRENCY AND TEMPO OF EXTINCTION. Helen M. Regan *et al.* en *American Naturalist*, vol. 157, n.º 1, págs. 1-10; enero 2001.

ENCYCLOPEDIA OF BIODIVERSITY. Dirigido por Simon Asher Levin. Academic Press, 2001.

THE SKEPTICAL ENVIRONMENTALIST. Bjørn Lomborg. Cambridge University Press, 2001.

INTRODUCCIÓN A LA BIOLOGÍA DE LA CONSERVACIÓN. Richard B. Primack y Joandomènec Ros. Ariel, 2002.



La evolución

del parto humano

Durante millones de años, el parto de los humanos y sus antecesores ha estado rodeado de dificultades. La costumbre de buscar asistencia en el alumbramiento hunde sus raíces en un pasado remoto

Karen R. Rosenberg y Wenda R. Trevathan

Dar a luz en la copa de los árboles no es muy habitual en los humanos, pero eso fue exactamente lo que Sophia Pedro se vio obligada a hacer durante las inundaciones que asolaron el sur de Mozambique en marzo del año 2000. Sophia permaneció cuatro días subida a un árbol para salvarse de las inundaciones que mataron a más de 700 personas en la región. El día después del parto, las televisiones y periódicos de todo el mundo mostraron las imágenes de la madre y su hijo recién nacido durante un dramático rescate con helicóptero.

Aunque insólito en los humanos, el parto en la copa de los árboles no constituye ninguna rareza en otras especies de primates. Durante millones de años éstos se han retirado a las copas de los árboles para parir. Los humanos somos la única especie de primates que habitualmente busca ayuda durante el parto. ¿Cuándo y por qué nuestros antepasados abandonaron el parto solitario y sin asistencia? La respuesta se encuentra en las dificultades y riesgos que conlleva el alumbramiento.

Muchas mujeres conocen por su propia experiencia que empujar el feto a través del canal del parto no es una tarea fácil. Es el precio que pagamos por haber adquirido un cerebro grande y poseer una inteligencia superior: el tamaño de la caja craneana de los humanos respecto al de su cuerpo es excepcional. Se sabe que el tamaño de la abertura de la pelvis por donde debe pasar el feto está limitado por nuestra locomoción bípeda. Pero sólo ahora empieza a comprenderse que los complejos movimientos y giros que las crías realizan al pasar por el canal del parto han representado un problema para los humanos y sus antepasados durante al menos 100.000 años.

Algunos fósiles indican también que la anatomía, y no sólo nuestra naturaleza social, ha conducido a las madres humanas a pedir ayuda durante el parto (al contrario que las madres de nuestros parientes más cercanos, los primates, y la mayoría del resto de los mamíferos). En efecto, la costumbre de buscar asistencia podría haber aparecido junto a los primeros miembros de nuestro género, *Homo*, y posiblemente se remonte unos 5 millones de años de antigüedad, cuando nuestros primeros antepasados iniciaron la marcha bípeda.

Una vía muy estrecha

Para comprobar nuestra hipótesis según la cual la asistencia en el parto ha existido desde hace milenios, hemos considerado, de entrada, la forma en que una cría de primate encaja en el canal del parto de la madre. Vista desde arriba, la cabeza del recién nacido es básicamente oval, alargada de adelante hacia atrás y más estrecha de oreja a oreja. Igualmente, el canal del parto (la abertura ósea de la pelvis por la que pasa el feto del útero al exterior) dibuja también un óvalo. El principal obstáculo a salvar en el parto de muchos primates es el del tamaño de la cabeza de la cría, muy similar al tamaño de dicha abertura.

A ese angosto trayecto los humanos añaden otra complicación: la sección del canal del parto no se mantiene constante. En efecto, la entrada del canal, donde el feto a término empieza su recorrido, es más ancha de un lado al otro de la madre. Sin embargo, a medio camino, esta orientación gira 90 grados y el eje mayor del óvalo se orienta de la parte delantera del cuerpo de la madre hacia su espalda. Eso significa que el feto debe realizar una serie de giros en su progreso por el canal para que las dos partes de su cuerpo con mayores dimensiones (la cabeza y los hombros) estén siempre alineadas con el diámetro mayor del canal.

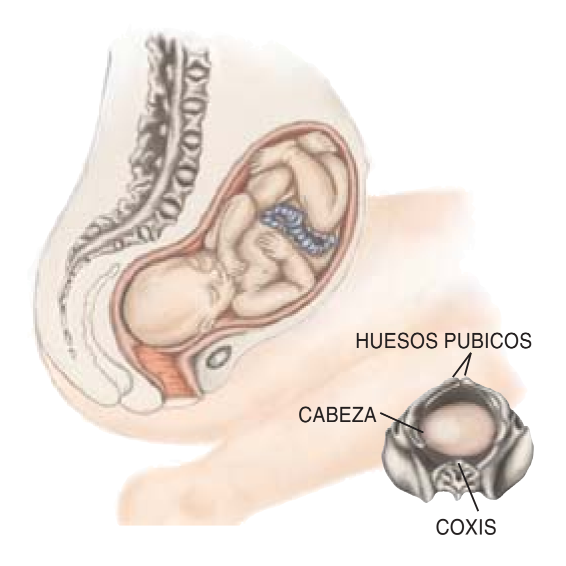
Para entender el proceso del parto desde el punto de vista de la madre, pensemos en una mujer a punto de dar a luz. El feto a término se encuentra en la mayoría de las ocasiones cabeza abajo, y cuando su cabeza entra en el canal del parto está mirando a un lado. Sin embargo, en la mitad del canal debe girar la cara para mirar hacia atrás, apoyando el occipucio en los huesos del pubis. En ese momento, los hombros están orientados de un lado a otro. Cuando el recién nacido se expulsa continúa con la cara orientada hacia atrás, pero girando ligeramente la cabeza hacia un lado. Esta rotación ayuda a girar los hombros para que puedan acomodarse al espacio que hay entre el pubis y el coxis. Para comprender la estrecha correspondencia que existe entre las dimensiones de la madre y las del feto, debemos saber que el canal del parto tiene un diámetro máximo de 13 centímetros y un diámetro mínimo de 10 centímetros. El diámetro antero-posterior de la cabeza de un recién nacido mide un promedio de 10 centímetros y los hombros una anchura media de 12 centímetros. El trayecto que debe recorrer a través de un canal de forma variable hace que el parto humano sea tan difícil y peligroso para la mayoría de madres e hijos.

Si retrocedemos lo suficiente en nuestro árbol evolutivo, llegaremos a un momento en el que el nacimiento no era tan difícil. Aunque los humanos estamos más próximos genéticamente a los simios antropomorfos (gibones, orangutanes, gorilas y chimpancés), los monos (resto de primates catarrinos y platirrinos) pueden representar un mejor modelo del parto en los antepasados de los homínidos. En efecto, entre los primates fósiles anteriores al primer homínido (*Australopithecus*), un posible antepasado remoto fue *Proconsul*, primate fósil con una antigüedad de 25 millones de años. Carecía éste de cola y mostraba probablemente el aspecto de un simio, pero su esqueleto indica un modo de locomoción más parecido al de un mono. Su pelvis también era muy similar a la de un mono. En la actualidad, la cabeza de una cría de mono representa aproximadamente el 98 por ciento del diámetro del canal del parto de la madre. Se trata de una situación similar a la que presentan los humanos, y no tanto a la de los chimpancés, cuyos canales del parto son más holgados.

A pesar de este paso tan estrecho, el nacimiento de las crías de mono procede con mayor simplicidad que en el caso humano. A diferencia de la forma retorcida del canal del parto humano, el canal del parto de los monos mantiene la misma forma de su sección horizontal desde la entrada hasta la salida. El diámetro mayor del canal se halla orientado antero-posteriormente y la parte más ancha del óvalo está cerca de la espalda de la madre. El feto a término de un mono penetra en el canal del parto introduciendo la cabeza en primer lugar, con la parte más ancha y posterior de su cráneo apoyada en la parte más espaciosa de la pelvis, cerca del coxis. Esto significa que la cría de mono sale del canal del parto con la cara mirando hacia delante; en otras palabras, con la cara en la misma dirección que la madre.

Las observaciones del parto de los monos han demostrado las ventajas que ofrece el nacer de cara. Las monas dan a luz sentadas sobre las patas posteriores o apoyándose en las cuatro patas. Cuando la cría está saliendo del canal del parto, la madre puede agacharse y guiar su salida, aproximándola a su pecho. En muchas ocasiones, la madre quita las mucosidades de la boca y nariz de la cría para que pueda respirar. Además, en el momento de la expulsión, las crías vienen con fuerza suficiente para participar de forma activa en su propio nacimiento. Una vez que las manos quedan libres, pueden agarrar el cuerpo de su madre y salir por sí mismas.

Si las crías humanas salieran de cara, el parto sería mucho más sencillo para la madre. En cambio, las modificaciones evolutivas de la pelvis humana que nos permiten caminar de forma bípeda obligan a la mayoría de crías humanas a salir con la nuca apoyada en el pubis, mirando en dirección a la madre. Por este motivo, es muy difícil para la parturienta —esté agachada, sentada o acostada— poder asistir a sus crías cuando están naciendo. Esta situación hace prácticamente imposible que la madre pueda ayudar a respirar a los recién nacidos, quitar el cordón umbilical del cuello e incluso acercar los bebés a los pechos. Si la madre tratase de acelerar el nacimiento cogiendo al recién nacido

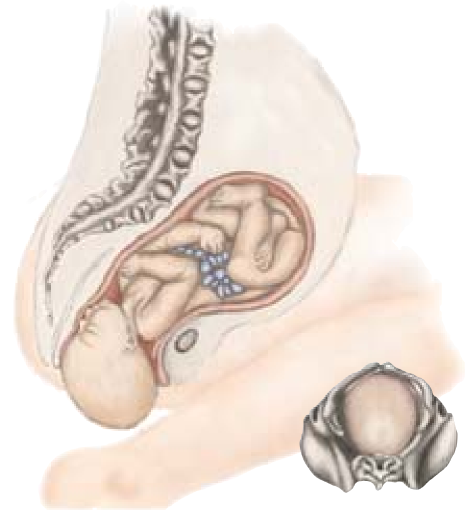


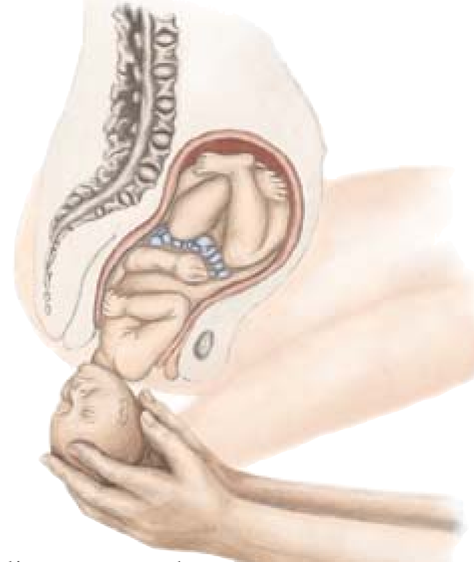
1. LOS HUMANOS NACEMOS con la cara mirando hacia atrás y con la parte posterior de la cabeza apoyada en los huesos del pubis materno. Por tanto, es difícil para la madre guiar al recién nacido en su salida del canal del parto (la abertura de la pelvis femenina) sin ayuda.

Las autoras

KAREN R. ROSENBERG y WENDA R. TREVATHAN aportan diferentes perspectivas al estudio del parto. Rosenberg, paleoantropóloga de la Universidad de Delaware, es especialista en la morfología de la pelvis. Ha estudiado fósiles de homínidos de Europa, Israel, China y Sudáfrica. Trevathan, antropóloga física de la Universidad estatal de Nuevo México, se ha interesado por el parto, el comportamiento maternal, la sexualidad, la menopausia y la medicina evolutiva. Ambas autoras conocen además el tema por propia experiencia: Rosenberg tiene dos hijas y Trevathan ha sido comadrona.







y guiar su salida, se correría el riesgo de doblar la espalda de la cría en dirección contraria a la curva natural de la columna. Poner la espalda de un recién nacido en ese ángulo podría provocar daños en su columna vertebral, en sus nervios y en sus músculos.

En los humanos contemporáneos la solución a estas dificultades es la búsqueda de asistencia durante el parto. Puede consistir en el auxilio de un obstreta, una comadrona o un miembro experto de la familia; pero esta asistencia ayuda a la madre a realizar todo aquello que las monas hacen por sí mismas y puede compensar las limitadas capacidades motrices de las crías. Las ventajas que ofrecen hasta las formas más simples de ayuda durante el parto han reducido la mortalidad de las madres y de las crías a lo largo de la historia.

Parto asistido

Por supuesto, nuestras antepasadas e incluso las mujeres actuales pueden dar a luz con éxito sin ninguna ayuda. No faltan en la literatura relatos novelados de campesinas pariendo solitarias, imágenes que han calado en la idea popular de la facilidad del parto. Pero los antropólogos que han estudiado el nacimiento en culturas de todo el mundo señalan lo infundado de tal creencia; en los humanos el parto rara vez es fácil y pocas veces se produce sin asistencia. Hoy en día, la mayoría de las mujeres de todas las sociedades se valen de otros. Incluso entre los !Kung del sur de Africa, en el desierto del Kalahari, que favorecen culturalmente el parto en solitario, las mujeres no dan a luz solas hasta que han alumbrado varios hijos con la presencia de sus madres, hermanas u otras mujeres. De esta forma, y aunque existen algunas excepciones, el parto asistido es una costumbre casi universal.

Teniendo esto en cuenta, y con la opinión de que esta costumbre se debe a las dificultades y riesgos que acompañan al parto humano, pensamos que las comadronas no son exclusivas de los humanos contemporáneos, sino que hunden sus raíces en nuestros antepasados. De acuerdo con nuestras propias investigaciones, las comadronas surgirían hace unos cinco millones de años, cuando la aparición del bipedismo redujo el tamaño y cambió la forma de la pelvis y del canal del parto.

Obviamente, un comportamiento tan complejo como el que rodea al alumbramiento no fosiliza, pero sí los huesos de la pelvis. El ajuste estrecho que existe entre el tamaño de la cabeza de la cría y el canal del parto de la madre en los humanos permite reconstruir el mecanismo del parto si se conocen sus respectivos tamaños. Gracias al registro fósil, nos es familiar la anatomía de la pelvis en bastantes períodos, y podemos estimar el tamaño del cerebro y del cráneo de las crías basándonos en la amplia muestra de tamaños de cráneos adultos. (Los cráneos de infantes, muy delicados, no se conservaron en buenas condiciones hasta que los humanos empezaron a enterrar a sus muertos, hace 100.000 años.) A través del tamaño y la forma de los cráneos y de las pelvis podemos determinar si los recién nacidos emergían mirando hacia adelante o hacia atrás, y comprobar cuán difícil puede resultar parir.

Marcha bípeda

En los humanos actuales el bipedismo y los cerebros grandes convergen para complicar el parto. No obstante, el cambio fundamental respecto a la forma del parto de los primates no humanos se debe a nuestro tipo de locomoción bípeda. Esta forma especial de desplazarse apareció en los primeros antepasados de los humanos, en el género *Australopithecus*, hace unos cuatro millones de años [*véase* “Evolución de la marcha humana” por C. Owen Lovejoy; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 1989]. A pesar de su postura erguida, los australopitecinos tenían poco más de un metro de altura y sus cerebros superaban sólo ligeramente los de los chimpancés actuales. Los recientes descubrimientos no aclaran qué especie de australopitecino dio lugar al género *Homo*. Sin embargo, sigue siendo importante comprender la forma en la que daban a luz, porque en especies emparentadas la



locomoción bípeda limitó de modo parejo el tamaño máximo de la pelvis y del canal del parto.

Para este período cronológico, la anatomía de la pelvis de la hembra se conoce gracias a dos fósiles bastante completos. El primero, STS 14 con 2,5 millones de años de antigüedad, fue descubierto en Sterkfontein, un yacimiento en la región sudafricana de Transvaal. El segundo corresponde a Lucy, un fósil descubierto en la zona etíope de Hadar y datado en unos tres millones de años de antigüedad. A partir del estudio de estos dos especímenes y de las estimaciones del tamaño del cráneo de los neonatos, C. Owen Lovejoy, de la Universidad estatal de Kent, y Robert G. Tague, de la de Louisiana, afirmaban a mediados de los años ochenta que el parto en los primeros homínidos difería del conocido en el resto de primates actuales.

El canal del parto de los australopitecinos tiene forma de óvalo aplastado con la dimensión mayor orientada de lado a lado, tanto en la entrada como en la salida. Esta geometría requiere que el mecanismo del parto difiera del de los monos, simios o humanos. La cabeza no podía haber rotado en el interior del canal, aunque nosotras pensamos que, para que los hombros encajasen mejor en ese trayecto, la cabeza debería haber girado al salir. En otras palabras, si la cabeza de la cría al entrar en el canal del parto lo hacía mirando a uno de los lados de la madre, los hombros estarían orientados del vientre a la espalda. Esta posición inicial significa que los hombros debían girar para acomodarse a la forma alargada transversalmente del canal del parto.

Esta sencilla rotación introdujo dificultades en el parto de los australopitecinos, que ninguna especie de primate había tenido antes. Dependiendo del lado al que giraban los hombros, la cabeza salía del cuerpo de la madre mirando hacia atrás o hacia adelante. Debido a que el canal del parto de los australopitecinos dibuja una forma elíptica simétrica, sin variación en su recorrido, el feto podía girar libremente los hombros hacia adelante o hacia atrás de su cuerpo, teniendo un 50 por ciento de probabilidades de nacer en una posición más ventajosa con la cara mirando hacia adelante. Si la cría nacía con

2. EN LOS MONOS el nacimiento de la cría con la cara hacia adelante permite que la madre pueda intervenir y guiarla fuera del canal del parto. Incluso puede eliminar las mucosidades de la cara del recién nacido para ayudarle a respirar.

El parto en diferentes culturas

La forma tan retorcida del canal del parto humano hace que a las mujeres embarazadas y a sus crías les resulte beneficiosa la ayuda de otras personas (merced a lo cual desciende el porcentaje de mortalidad, el dolor y la ansiedad). La ventaja evolutiva de este auxilio nos permite entender por qué el parto asistido es una costumbre prácticamente universal. Por supuesto, a lo largo de la historia y en circunstancias especiales, algunas mujeres han dado a luz solas. Pero lo habitual es parir con la ayuda de amigas o familiares. (La participación de los varones puede estar prohibida, tolerada, bien recibida e incluso ser requerida.) En las sociedades occidentales, donde la mujer normalmente da a luz en presencia de desconocidos, algunos estudios han demostrado que el concurso de una persona que proporcione respaldo social y emocional a la mujer que está de parto reduce el número de complicaciones.

En muchas sociedades, a la mujer no se le considera persona adulta hasta que ha tenido un hijo. A menudo, el sitio donde se producen los nacimientos es un lugar específico, así como la postura que debe adoptar la parturienta. En la cultura occidental la mujer pare acostada sobre su espalda en una cama, pero en el resto del mundo son más frecuentes las posturas erguidas: sentada, agachada o, en algunas ocasiones, de pie.



Entre las culturas no occidentales, una de las formas habituales del parto es la reflejada en la fotografía.

la cara hacia atrás, la madre australopitecina —al igual que las madres humanas actuales— podría haberse beneficiado de la presencia de algún tipo de ayuda.

Desarrollo de un cerebro grande

Si el bipedismo trajo suficientes dificultades hasta hacer necesaria la asistencia, el crecimiento en el tamaño del cerebro de los homínidos introdujo nuevos obstáculos. En la evolución humana, el mayor tamaño del cerebro de los adultos y de las crías apareció con posterioridad a los australopitecinos, en particular en el género *Homo*. Escasean pelvis fósiles de los primeros *Homo*; el individuo mejor conservado es el esqueleto del muchacho del Turkana, un adolescente de hace 1,5 millones de años, procedente del yacimiento de Nariokotome (Kenia). Se admite que los adultos de la especie a la que pertenece este muchacho tendrían el doble de tamaño cerebral que los australopitecinos, si bien representaría sólo dos tercios del tamaño cerebral de los humanos actuales.

Christopher B. Ruff, de la Universidad Johns Hopkins, y Alan Walker, de la estatal de Pennsylvania, han reconstruido la pelvis de este adolescente a partir de fragmentos y estimado el aspecto que tendría cuando hubiese llegado a la edad adulta. A partir de las diferencias entre las pelvis masculinas y las femeninas que conocemos en especies más recientes de homínidos, infirieron cómo sería una hembra de esa especie y la forma del canal del parto. Sería ésta ovalada y similar a la de los australopitecinos. Basándose en tales reconstrucciones, determinaron que la especie a la que pertenece el muchacho del Turkana tuvo un mecanismo del parto similar al de los australopitecinos.

En los últimos años, se ha venido sometiendo a prueba una importante hipótesis que se deduce de la afirmación de Ruff y Walker: la anatomía de la pelvis de los primeros *Homo* pudo haber limitado el crecimiento del cerebro hasta un momento de la evolución en el que el canal del parto se expandió lo suficiente como para permitir el paso de una cabeza grande. A tenor de esa hipótesis, unos cerebros mayores y pelvis más espaciosas estaban relacionados desde una perspectiva evolutiva. Los individuos que mostraban ambas características tenían más éxito al dar a luz a descendientes que sobrevivían y heredaban dichas características. Los cambios en la anatomía de la pelvis, acompañados de la asistencia en el parto, pueden haber permitido el aumento espectacular del tamaño cerebral, que aconteció desde hace 1 millón de años hasta hace 100.000 años.

Los fósiles que cubren los últimos 300.000 años de la evolución humana respaldan la conexión entre el aumento del cerebro y los cambios en la anatomía pelviana. En los últimos 20 años, se han descubierto tres fósiles de pelvis pertenecientes a *Homo sapiens* arcaicos: un individuo masculino de más de 200.000 años procedente de la Sima de los Huesos en la Sierra de Atapuerca (España), una mujer de 280.000 años de antigüedad hallada en Jinniushan (China) y una pelvis de un individuo masculino neandertal (también considerado *Homo sapiens* arcaico), de 60.000 años de antigüedad, procedente de Kebara (Israel). Todos estos especímenes presentan el canal del parto retorcido como el de los humanos actuales; por lo tanto, sus crías, dotadas de grandes cerebros, efectuaban muy probablemente la rotación de la cabeza y de los hombros en el canal del parto y nacieron con la cara mirando a la madre, un gran problema que debían afrontar las parturientas para dar a luz con éxito.

La triple dificultad de recién nacidos con grandes cerebros, una pelvis diseñada para la locomoción bípeda y un parto rotacional en el que la cría emerge con la cara mirando hacia atrás no es asunto de interés menor. La selección natural debió favorecer la existencia de una conducta de búsqueda de ayuda durante el parto, pues esta asistencia permitía superar las dificultades. Sin embargo, las madres no sólo buscaban ayuda al prever los riesgos de dar a luz. Con mayor probabilidad el dolor, el miedo y la ansiedad les condujeron a desear compañía y seguridad.

Los psiquiatras afirman que la selección natural pudo haber favorecido ese tipo de emociones —también comunes durante las enfermedades y las lesiones—, porque eso provoca que los individuos que sufren estas experiencias busquen la protección de compañeros, que les proporcionan una mayor probabilidad de sobrevivir [*véase* “Evolución y orígenes de la enfermedad” por Randolph M. Nesse y George C. Williams; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1999]. Los descendientes de los supervivientes tendrían una mayor probabilidad de experimentar este tipo de emociones durante los momentos de enfermedad y dolor. Teniendo en cuenta la ventaja evolutiva que el miedo y la ansiedad pueden aportar, no sorprende que las mujeres sientan estas emociones durante el parto.

Las mujeres actuales suman un doble legado evolutivo: la necesidad de asistencia física y el concurso del auxilio emocional. Cuando Sophia Pedro dio a luz en un árbol rodeada de una llanura inundada, pudo haber contado con ambos tipos de apoyo. En una entrevista, algunos meses después de su rescate, explicó que su suegra, que también estaba con ella en el árbol, le ayudó durante el parto. La búsqueda de este tipo de asistencia puede ser tan antigua como la propia humanidad.

Bibliografía complementaria

HUMAN BIRTH: AN EVOLUTIONARY PERSPECTIVE. Wenda R. Trevathan. Aldine de Gruyter, 1987.

BIRTH AS AN AMERICAN RITE OF PASSAGE. Robbie Davis-Floyd. University of California Press, 1993.

BIPEDALISM AND HUMAN BIRTH: THE OBSTETRICAL DILEMMA REVISITED. Karen R. Rosenberg y Wenda R. Trevathan en *Evolutionary Anthropology*, vol. 4, n.º 5, páginas 161-168, 1996.

ON FERTILE GROUND: A NATURAL HISTORY OF HUMAN REPRODUCTION. Peter T. Ellison. Harvard University Press, 2001.



1. VISLUMBRE de un futuro con periódicos capaces de reescritura. Este prototipo de la compañía E-Ink "imprime" el texto utilizando una "tinta electrónica". Un panel de transistores de capa fina IBM suministra las tensiones de alimentación de la tinta. El panel comprende 800 por 600 píxeles, cada uno de ellos formado por un pigmento cargado (la "tinta"). Para componer el texto se utilizan unas varillas de memoria programable con borrado eléctrico.

Un "papel" digital que presente textos
y gráficos variables combinaría
de manera ideal las ventajas
de la impresión tradicional
con las posibilidades de las pantallas
de vídeo. Dos técnicas distintas
compiten por alcanzar esta meta.
De aquí a diez años podríamos
ver libros y periódicos electrónicos
flexibles y modificables.

Steve Ditlea

No es extraño que siga imponiéndose la tradicional escritura con tinta sobre papel en un mundo digitalizado donde tampoco era de esperar que desapareciera. Comparada con las actuales pantallas de ordenador, ofrece excelente resolución y alto contraste desde un amplio margen de ángulos de visión, no necesita energía externa para retener la imagen, pesa poco, cuesta todavía menos y es notablemente flexible (en sentido literal y figurado).

Pero no podemos borrar lo escrito en el papel y reutilizar éste millones de veces instantáneamente, como es característica esencial de las pantallas informáticas sin que sufran el menor desgaste. Una tinta electrónica con la que pudiera escribirse en papel anunciaría una era de rótulos y carteleras susceptibles de renovarse sin tener que destruir hectáreas de árboles, de libros electrónicos que conservarían el tacto familiar de los libros tradicionales, de revistas y periódicos que se distribuirían por medios inalámbricos a páginas visualizadas delgadas y flexibles.

En los últimos treinta años se ha intentado varias veces producir este tipo de papel electrónico, pero hasta hace muy poco no ha alcanzado su investigación pleno desarrollo. Tal vez antes de 2010, merced a la pugna entre dos firmas iniciadoras, *Investigación y Ciencia* y otras revistas se publiquen regularmente por este sistema. Ambas compañías proceden de grandes instituciones: el Centro de Investigación de Palo Alto (PARC) de Xerox y el Laboratorio de Medios (Media Lab) del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Una y otra basan su técnica en unas diminutas cuentas con carga eléctrica, cuya capacidad de formar imágenes se controla electrónicamente. Y no sólo luchan por comercializar sus logros, sino que se preparan a competir con los diodos fotoemisores orgánicos que empiezan a salir de los laboratorios.

El origen del papel eléctrico

Los primeros escarceos en el "papel eléctrico", como se denominó en un principio, vinieron en respuesta a la escasa calidad visual de las pantallas de ordenador. Era a principios de los años setenta. "Los TRC (tubos de rayos catódicos) daban muy poca luz", recuerda Nicholas Sheridon. "Quería encontrar un material visualizador con tantas propiedades del papel como fuera posible, no un sustitutivo."

Hace tres años, Sheridon, investigador del PARC, demostraba prototipos de lo que Xerox entonces llamaba "papel electrónico reutilizable". Más de veinte años antes, en el PARC, había expuesto la idea básica de este medio de visualización: unas cuentas de plástico apenas del grosor de un cabello humano embutidas en una película transparente flexible. Cada cuenta tiene una mitad negra y la otra mitad blanca, con cargas eléctricas opuestas. Aplicando un campo eléctrico apropiado a la superficie transparente, la cuenta podrá girar de modo que constituya un punto blanco o negro en el plano de visión, con efecto similar a una minúscula gota de tinta que se coloca en el lugar adecuado.

Sheridon dio el nombre de Gyricon a su invento (en griego "imagen que gira"). Pronto fue relegado por los directivos de Xerox, más interesados en explorar nuevas técnicas de impresión que en fabricar pantallas, pero el concepto de papel reutilizable revivió 15 años después en los prototipos mencionados.

Tendría que esperar todavía más para que esta técnica llegara a comercializarse. Primero nació una compañía independiente, Gyricon Media, empresa radicada en Palo Alto (en la que Xerox retuvo una participación mayoritaria). Hacia marzo de 2001 la nueva firma presentó por primera vez su producto en Chicago, en la exposición GlobalShop para rótulos y carteles de establecimientos comerciales. En la planta baja del centro de McCormick Place, podía verse a Sheridon, ahora director de investigación de Gyricon Media, admirando un panel verde humo de 28 por 36 centímetros fijado en un stand de aluminio, como los que suelen indicar los departamentos de un cen-

2. A LOS TREINTA AÑOS de su idea inicial de crear una pantalla electrónica lo más parecida al papel posible, Nicholas Sheridon, de Gyricon Media, demuestra la viabilidad de los carteles SmartPaper. Estos carteles, ahora comercializados bajo la marca MaestroSign, pueden ahorrar miles de euros en costes de rotulado a las tiendas.

tro comercial. Por el panel desfilaban varios mensajes de venta y el precio “$89,99” en tipos ligeramente moteados; lo alimentaban tres baterías AA de hasta dos años de duración. Casi 30 años después de su inspiración original, el papel eléctrico de Sheridon era una realidad, aunque con limitaciones.

La resolución del prototipo de lo que hoy se denomina SmartPaper (“papel inteligente”) equivalía al modesto valor de 100 puntos por pulgada (ppp). A efectos comparativos, la versión impresa de esta revista tiene una resolución de 1200 ppp. Y como habían de utilizarse electrodos inflexibles para activar el material plegable SmartPaper (una película de caucho silicónico impregnado en aceite para que puedan girar las cuentas de bicromato), esta versión de papel electrónico era rígida como una tabla.

Sheridon espera que este año salgan al mercado paneles de tamaño semejante que puedan reescribirse fácilmente a través de una red inalámbrica. Para los grandes almacenes y centros comerciales, sería de gran utilidad este tipo de señalización renovable. Aparecerán muy pronto unos cartelitos SmartPaper menores para mantener actualizados los precios en los estantes de los supermercados.

Los periódicos o revistas del futuro —electrónicos, plegables y reutilizables— podrían ser realidad en pocos años. En su concepción ideal, se tiraría de la hoja de SmartPaper como de un rollo de papiro a través de la ranura de un cilindro de aluminio. En el modelo funcional, unos electrodos alineados en el borde del cilindro imprimirán noticias o reportajes de última hora en la superficie flexible y engomada del papel, que estará protegido contra deterioros por unas láminas de plástico. Se están preparando, además, unas cuentas de menor tamaño, necesarias para mejorar la resolución. En cuanto a la gama de colores, Sheridon ha registrado una patente de coloración sustractiva que utiliza cuentas Gyricon transparentes con discos delgados para filtrar los colores cian, magenta y amarillo, a cada uno de los cuales se accede por diferentes niveles de tensión. Pese a todo, y por mucho que se le parezca, este papel electrónico jamás tendrá la misma consistencia del papel real.

Marcar con tinta electrónica

El papel real, apto para la impresión, fue el punto de partida para el principal rival de Gyricon Media en el mercado del papel digital. Por distinto camino que Sheridon, Joseph Jacobson buscaba en 1995 un problema interesante que abordar para su trabajo de posdoctorado en la Universidad de Stanford. Preparó un libro cuyas páginas pudieran reconfigurarse electrónicamente para contener el texto de *El Quijote*, *La Teoría General de la Relatividad* o cualquiera otra de los cientos de obras almacenadas en memoria de silicio en el lomo del libro.



3. JOSEPH JACOBSON, del Media Lab del MIT y E-Ink, se propone crear el efecto de un papel real que se imprime a sí mismo. Su meta final es un cibercódigo, “el libro final”, un volumen encuadernado de centenares de páginas escritas en tinta electrónica con suficientes pastillas de memoria para almacenar entera la Biblioteca del Congreso.

Por técnica de formación de imágenes Jacobson utilizó la electroforesis, es decir, el movimiento de partículas cargadas sometidas a un campo eléctrico en el seno de un líquido. En lugar de cuentas pigmentadas, empleó microcápsulas de un polímero transparente que contenía un tinte líquido azul y partículas blancas. Cuando las partículas con carga positiva de dióxido de titanio blanco permanecen en el lado visible de las microcápsulas, se produce una página blanca; al aplicar carga negativa al electrodo situado bajo la cápsula, estas partículas son atraídas hacia el otro lado y crean una imagen parecida a la tinta, hasta que un impulso eléctrico de sentido opuesto restablezca en su lugar el pigmento blanco. Al invertir el proceso se forman letras blancas sobre fondo oscuro. Estas microcápsulas suspendidas en agua pueden imprimirse, como si fueran tinta, en papel o en materiales que soporten electrodos. Jacobson dio el nombre de “tinta electroforética”, o “tinta-e”, a esta composición.

El autor

STEVE DITLEA se viene dedicando, desde hace muchos años, a la alta divulgación de las aplicaciones técnicas de la física.

Una vez contratado en el Media Lab del MIT en 1995, continuó investigando en la tinta-e con dos alumnos, J. D. Albert y Barrett Comiskey. Los tres juntos, acompañados por Russell Wilcox, fundaron en 1997 E-Ink Corporation en Cambridge. La nueva empresa no tardó en atraer fondos de empresas y una beca de investigación y desarrollo de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA).

En 1999 E-Ink introdujo los primeros carteles para comercios utilizando técnica propia. Los carteles eran rígidos, llevaban la marca Inmedia y medían 122 × 183 centímetros, presentando sobre fondo azul unos caracteres blancos grandes en cursiva (con resolución equivalente a 2 ppp). Se probaron en varias tiendas, anuncios de titulares de algún periódico y tablones de publicidad. Quedó comprobada la eficacia de los carteles para aumentar la afluencia de público y las ventas en los comercios que adoptaron el sistema E-Ink, si bien los clientes deseaban una mayor variedad de tipos, colores y grafismos. Hasta que no desarrolle una nueva generación de carteles para tiendas, E-Ink se ha retirado del mercado.

Jacobson no participa en las operaciones cotidianas de E-Ink, pero dedica la mayor parte de su tiempo a dirigir el Grupo de investigación sobre máquinas moleculares del Media Lab. Michael McCreary, vicepresidente de investigación y desarrollo de E-Ink, explica que en el plan de actividades de la empresa siempre se han considerado los carteles comerciales como un primer paso para probar la viabilidad de la tinta electrónica. “Nuestra etapa siguiente será desarrollar pantallas de alta resolución para aparatos portátiles.” Y como ejemplo enseña una pantalla rígida de mejor contraste (resolución 80 ppp) y visible desde ángulos más abiertos que la pantalla monocroma normal de cristal líquido (LCD) de un ordenador de bolsillo.

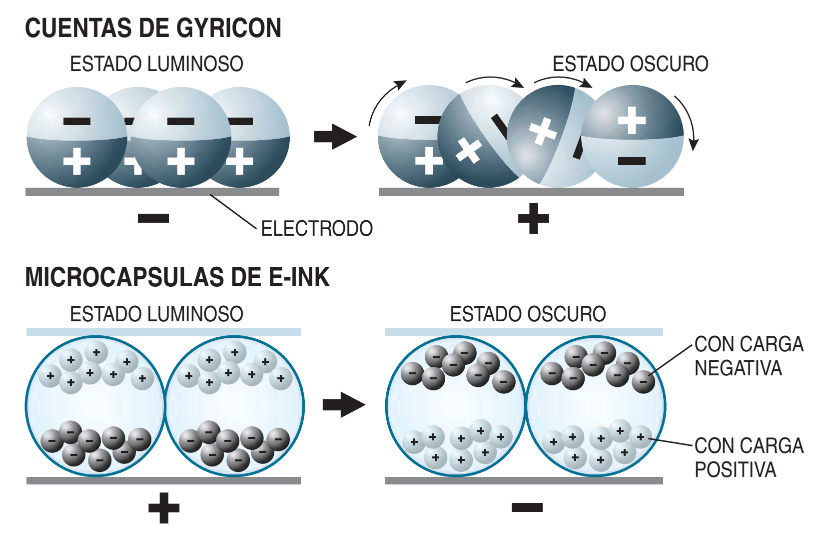
En febrero, Philips Components, división de la holandesa Royal Philips Electronics, se aseguró los derechos mundiales exclusivos durante un período de tiempo para fabricar y vender módulos visualizadores con la técnica E-Ink para ayudantes personales digitales (PDA) y libros electrónicos a cambio de una inversión millonaria en la compañía. Esta versión de papel electrónico consume sólo la centésima parte de una pantalla LCD comparable, con lo que Philips puede capitalizar una ventaja competitiva de sus aparatos de bolsillo en cuanto a vida de las baterías, que será tangible en los dos años venideros.

Otro socio comercial, Lucent Technologies, concedió a E-Ink el derecho de utilizar su técnica del transistor plástico desarrollada en los Laboratorios Bell, al tiempo que invertía en la empresa. En noviembre de 2000 la alianza dio como fruto la primera pantalla flexible de tinta electrónica: un cuadrado de cinco pulgadas (12,7 centímetros) de lado con la consistencia y el grosor de una alfombrilla de ratón y sólo 256 píxeles, en la que desfilaban patrones de tablero de ajedrez, los nombres de las compañías y el logotipo de E-Ink. Esta demostración vino a probar que podía fabricarse una matriz activa de circuitos capaz de direccionar las microcápsulas de tinta electrónica con materiales plásticos estampados en caucho sobre una lámina de plástico flexible.

En el siguiente abril, E-Ink y otro socio más, IBM Research, habían anunciado su primera pantalla de tinta electrónica con matriz activa de resolución mayor: una pantalla de 12,1 pulgadas de diagonal con resolución comparable a 83 ppp, que viene a ser la definición típica de la pantalla de un ordenador portátil. Para satisfacer las exigencias de la electrónica

ASI FUNCIONA EL PAPEL ELECTRONICO

Las dos técnicas en desarrollo comercial para visualizadores de tipo papel susceptibles de configuración electrónica se basan en cuentas microscópicas que cambian de color en respuesta a la carga de unos electrodos cercanos. En el sistema SmartPaper, de Gyricon Media, se emplean cuentas sólidas de dos tonos que rotan en su sitio (*arriba*). El descubrimiento de Sheridon consistió en obtener estas diminutas cuentas simétricas vertiendo resinas negras y blancas sobre un disco que giraba a muchas revoluciones. La tinta electrónica de E-Ink utiliza microcápsulas transparentes que contienen esferitas de pigmento móviles en el seno de un líquido (*abajo*). La fabricación aplica técnicas normalizadas y desarrolladas para recubrimientos microencapsulados en formatos comerciales.



de IBM, los técnicos de E-Ink hicieron que sus microcápsulas cambiaran de color diez veces más aprisa que en su formulación original. Y lograron mejorar el contraste eligiendo un color negro intenso en vez de azul para el tinte encapsulado.

Ya en mayo, E-Ink y la compañía japonesa Toppan Printing introdujeron un prototipo de pantalla de tinta electrónica en color. Utilizando unas redes de filtrado de color de Toppan, hoy muy comunes en las LCD normales, la pantalla de demostración presentaba ocho colores distintos. Mediante esta técnica, E-Ink espera producir pantallas capaces de exponer 4096 colores, equiparables a las pantallas de ordenadores de bolsillo y de videojuegos.

Estos prototipos recientes son pasos que avanza E-Ink hacia su meta final. En la tercera etapa del plan de actividades de E-Ink, ésta sería "el radiopapel", un papel digital flexible con capacidad de alta resolución de color y susceptible de reconfigurarse a través de una red de datos inalámbrica. Además, el radiopapel podría ser una realidad comercial hacia 2005, y para entonces pueden haberse difundido técnicas similares procedentes de Gyricon u otras compañías.

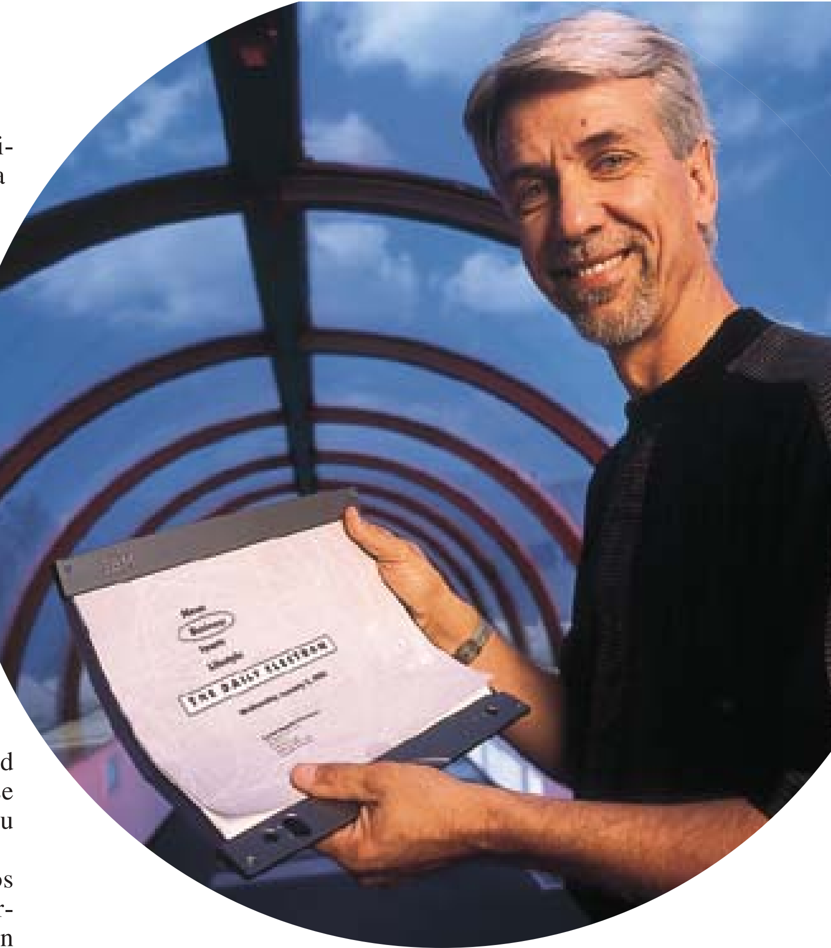
E-Ink tendrá también que competir con los diodos fotoemisores orgánicos. A partir de componentes carbonados semejantes a los plásticos que se utilizan en la pantalla flexible de E-Ink y Lucent, pueden obtenerse semiconductores emisores de luz también plegables y con un rendimiento energético bastante eficaz. El hecho de que sean Eastman Kodak, IBM y otras firmas de garantía financiera quienes emprenden tal desarrollo pronto dará credibilidad a esta alternativa al papel electrónico.

El libro final

Casi desde un principio, Jacobson ha incluido en su concepción del futuro de la tinta electrónica lo que él llama "libro final". Comprendería cientos de páginas de un papel autoimprimible, llevando cada una de ellas estampado un procesador independiente; estas páginas irían encuadernadas en un volumen en pasta con plaquetas de memoria en el lomo, suficientes para almacenar todo el contenido de la Biblioteca del Congreso. Puesto que en una sola página de papel tratado con tinta electrónica se puede reproducir cualquier página almacenada de texto, gráficos o hasta de vídeo, ¿por qué molestarse en reunir tantas páginas encuadernadas? Jacobson lo justifica apelando a la memoria espacial del lector: es más fácil localizar un determinado párrafo o ilustración hojeando a mano las páginas de un libro entero.

A medio camino entre el tomo de Jacobson y el rollo de Sheridon, existe otro formato susceptible de aplicarse a la publicación en papel electrónico. Se trata de una variante actualizada de los pliegos de impresión, es decir, un número de páginas dado por potencias binarias (8, 16 o 32) que se cortan de una plancha impresa. En 1999 Robert Steinbugler, responsable del programa de diseño estratégico de la Compañía IBM, inventó un prototipo de diseño de periódico electrónico: un dispositivo visualizador en forma de cartera, flexible y engomado, que contiene ocho hojas de doble cara de papel digital (de momento, sólo imitación en plástico). A través de entrevistas con editores y lectores de periódicos, Steinbugler llegó a la conclusión de que la disposición de páginas en paquete permitía avanzar o retroceder de un artículo a otro sin tener que rehacer sus textos, al tiempo que ofrecía la fortuita yuxtaposición de artículos que todavía distingue a los periódicos impresos de su versión en línea, pantalla por pantalla.

Dada la apresurada búsqueda del papel electrónico en estos días, tal vez no falte mucho para que los lectores de *Investigación y Ciencia* puedan elegir entre versiones electrónicas en folio, tomo encuadernado o rollo de papiro.



4. ROBERT STEINBUGLER, responsable del programa de diseño estratégico de IBM, presenta su idea de un visualizador de tipo cartera, flexible y engomado, con ocho páginas de doble cara de papel digital. El "periódico electrónico" combina la familiar experiencia de pasar las páginas con la conveniencia de reescribir textos de modo instantáneo.

Bibliografía complementaria

THE LAST BOOK. Joseph Jacobson en *IBM Systems Journal,* vol. 36, n.º 3, 1997.



Las ciencias de la Tierra en el último cuarto de siglo

Agustín Udías

El avance de nuestros conocimientos sobre la Tierra en los últimos 25 años se funda, en gran parte, en el desarrollo de nuevos instrumentos y métodos de observación. Prácticamente en todos los campos de la geofísica, los avances de la microelectrónica han contribuido al desarrollo de instrumentos de medida de técnica digital con un rango dinámico muy grande. El avance en los ordenadores de gran capacidad y rapidez de cálculo permite hoy el análisis de estos datos y su comparación con modelos cada vez más realistas de los procesos de la Tierra.

Entre los desarrollos más espectaculares están, sin duda, las observaciones de la Tierra desde satélites artificiales, que han creado una nueva disciplina, la teledetección. Los primeros satélites artificiales se lanzaron en 1957, pero hasta los años ochenta no empezó a aplicarse toda su potencialidad para el estudio de la Tierra. Todos sabemos lo que ha supuesto para la meteorología la observación global a través de las redes de satélites. Otro ejemplo es el del campo de la geodesia espacial, que con observaciones de satélites ha permitido establecer modelos muy exactos del geoide o forma de la Tierra.

El establecimiento entre 1973 y 1992 del sistema de localización global GPS (Global Positioning System), aunque al principio creado para su uso militar, ha abierto el campo a numerosas aplicaciones científicas en el campo de la geodesia y geofísica. Este sistema consiste en un conjunto de unos 24 satélites en órbitas de unos 20.000 km de altura, dispuestos de forma que en cualquier parte del mundo siempre hay al menos 4 sobre el horizonte y permite determinar la posición de un punto con mucha exactitud, hasta del milímetro.

El estudio del campo magnético terrestre también se ha beneficiado del avance instrumental con el desarrollo de los magnetómetros atómicos desde los años cincuenta y, más modernamente, los criogénicos, y con las observaciones desde satélites desde los años sesenta. Merced a estas observaciones desde el espacio, nos hemos acercado a la estructura de la magnetosfera, la última envoltura terrestre en la que está confinado el campo magnético de la Tierra. Con ordenadores cada vez más potentes se han ideado modelos realistas del origen del campo magnético interno de la Tierra, problema que en el pasado se consideraba de muy difícil solución.

En sismología se ha producido también una verdadera revolución con el desarrollo de los sismógrafos digitales de banda ancha en los años ochenta. Estos sismógrafos, con una respuesta plana desde 20 ciclos por segundo hasta 1000 segundos y un alto rango dinámico, permiten registrar con notable precisión terremotos lejanos y cercanos. Tejen ya una red global bastante densa de estaciones que han terminado por desplazar a los sismógrafos tradicionales. Con los datos proporcionados por ellos se define mejor el proceso de fractura que da origen a los terremotos y la estructura del interior de la Tierra.

A través de Internet podemos recabar datos geofísicos de todo tipo, prácticamente en tiempo real, por medio de los servicios de bancos de datos conectados con esta red global de comunicación. Al alcance de cualquier investigador se halla ahora la información observacional que precise para su tarea, no importa el campo en que trabaje. Por ejemplo, poco tiempo después de suceder un terremoto, un sismólogo puede disponer de los sismogramas digitales de estaciones en todo el mundo. Esta misma vía de comunicación facilita el intercambio de datos e ideas, entre investigadores en cualquier parte del mundo, con gran rapidez.

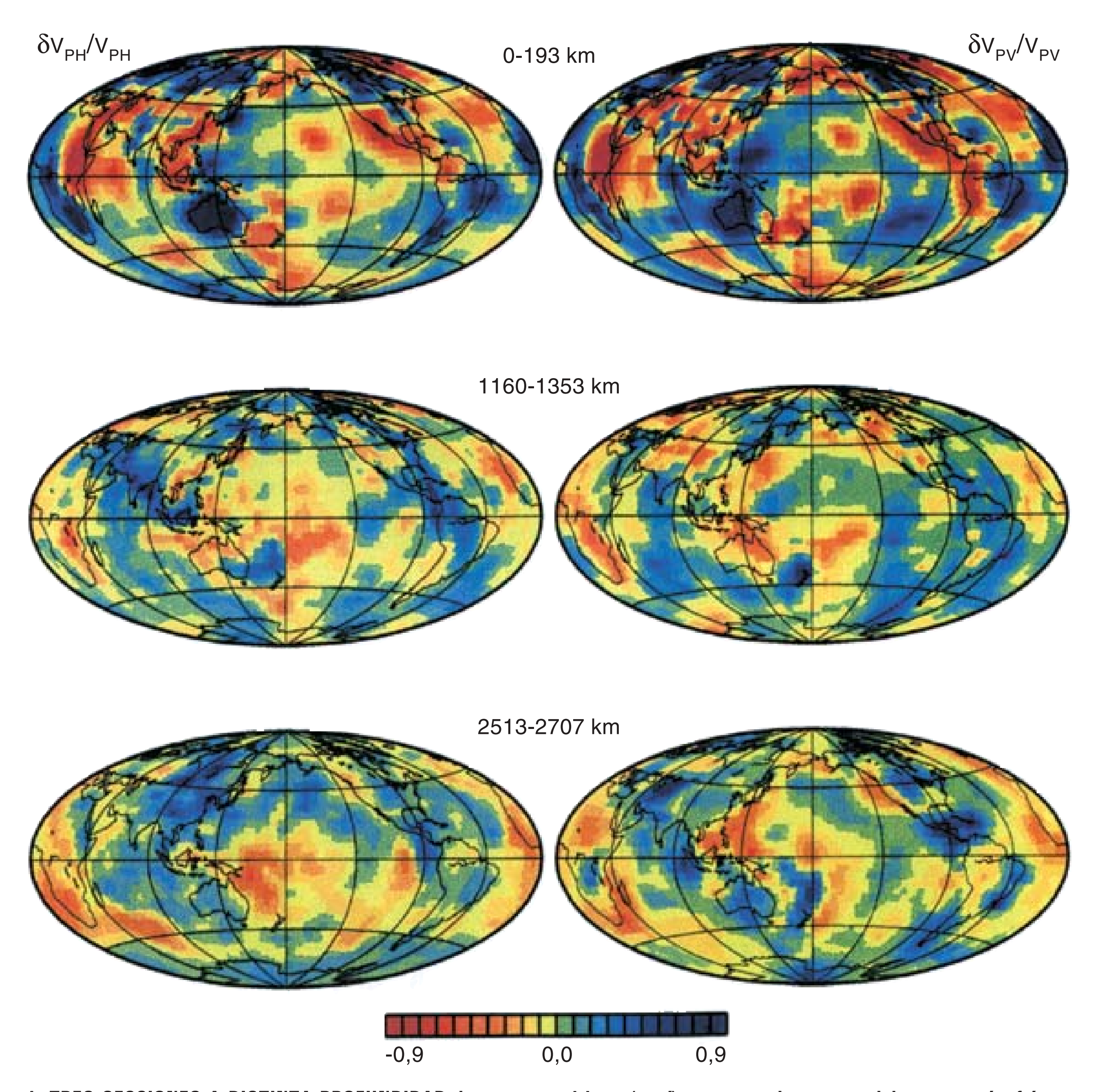
Estructura tridimensional de la Tierra

Durante la primera mitad del siglo XX se establecieron las líneas generales de nuestro conocimiento sobre el interior de la Tierra. En 1906 Richard Oldham estableció la existencia del núcleo y su naturaleza fluida, y en 1912 Beno Gutenberg midió su profundidad desde la superficie en 2900 km, medida que ha cambiado poco. En

El autor

AGUSTIN UDIAS, catedrático de la Universidad Complutense, viene estudiando desde hace años la geofísica local y general del planeta.

Gracias a nuevos instrumentos y métodos de observación, así como a la utilización de ordenadores de gran capacidad y rapidez de cálculo y memoria, los últimos 25 años han supuesto un gran adelanto para nuestro conocimiento de la Tierra y sus envolturas, océanos y atmósfera y de los procesos que se desarrollan en su seno



1. TRES SECCIONES A DISTINTA PROFUNDIDAD de un modelo tridimensional del manto terrestre con anisotropía obtenidas por estudios de tomografía sísmica. Los colores representan las anomalías de la velocidad de las ondas P (δV_P) divididas por el valor de la velocidad (V_P), separando el componente horizontal ($\delta V_{PH}/V_{PH}$) del vertical ($\delta V_{PV}/V_{PV}$) para detectar la anisotropía. Las anomalías positivas (*azul*) muestran las zonas del manto más frías y las negativas (*rojo*) las más calientes. [Tomado de L. Boschi y A. Dziewonski, 2000. Whole Earth tomography from delay times of P, PcP and PKP phases: Lateral heterogeneities in the outer core or radial anisotropy in the mantle. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, págs. 13.675-13.696. (Copyright 2000, American Geophysical Union.)]

1932 Inge Lehmann descubrió la existencia del núcleo interno sólido, siendo sólo fluido el externo. La discontinuidad entre la corteza y el manto fue descubierta en 1919 por Andrija Mohorovicic.

Este conjunto de hallazgos se debieron al análisis de las ondas sísmicas y fueron el resultado de las observaciones realizadas con la primera generación de sismógrafos. Cada vez que se produce un gran terremoto, las ondas que genera iluminan el interior de la Tierra, y permite a los que las estudian, a través de los sismogramas, deducir a partir de ellas la estructura de su interior. De esta forma, hacia 1970 se conocían con cierta exactitud la distribución de las velocidades de las ondas sísmicas, la densidad y los coeficientes elásticos en el interior de la Tierra. Los modelos que representaban este interior eran de simetría esférica y especificaban sólo la distribución de tales parámetros con el radio.

Los modelos se fueron afinando. Se estableció, con bastante detalle, la variación de estos parámetros con la profundidad. La velocidad de las ondas P y S aumenta con la profundidad en la corteza y el manto de la Tierra de forma gradual. En el manto, la velocidad de las ondas P aumenta entre 8 y 13,7 km/s y las de la S entre 4 y 7,2 km/s. La densidad, por su parte, aumenta entre 3,3 y 5,6 g/cm^3. En el núcleo externo, a pesar de que la densidad aumenta de 5,6 a 9,9 g/cm^3, la velocidad de las ondas P disminuye a 8,1 km/s y la de las ondas S es nula. En el núcleo interno, cuya densidad se cifra en 13,1 g/cm^3, la velocidad de las ondas P es de 11,3 km/s y la de las ondas S, 3,7 km/s.

La distribución de temperaturas se conoce con menor exactitud. Muestra, sin embargo, un crecimiento rápido de la temperatura con la profundidad, que en los primeros 100 km llega a los 1500 ºC. A mayores profundidades, el aumento de la temperatura es más lento y gradual, hasta los aproximadamente 7000 ºC en su centro. También en este caso los modelos daban sólo la distribución de la temperatura con el radio.

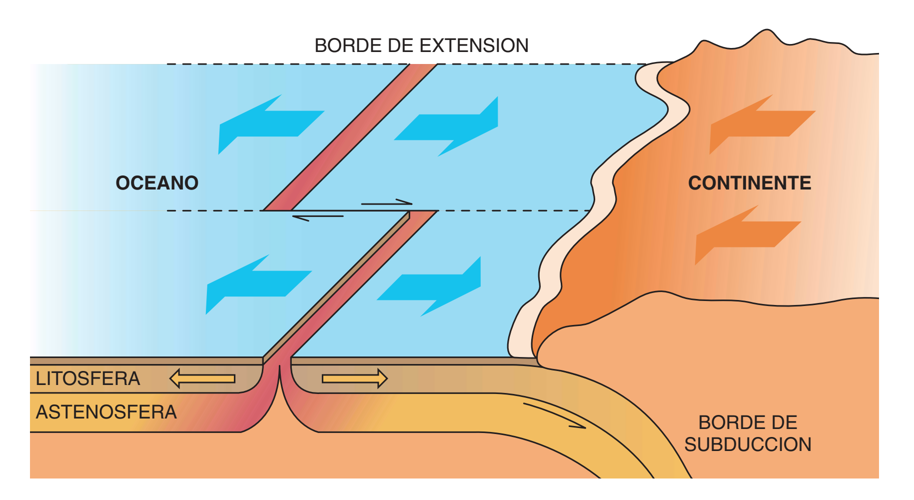
Desde los años setenta, el advenimiento de una nueva técnica de análisis de las ondas sísmicas y nuevos desarrollos en la instrumentación han abierto un nuevo camino a nuestro conocimiento del interior de la Tierra. La técnica en cuestión, que abarca diferentes métodos, se denomina tomografía sísmica. Los fundamentos de la teoría general de la tomografía se basan en los trabajos publicados en 1917 por el matemático J. Radon. El desarrollo de su aplicación práctica, en 1963, se debe a A. Cormack.

Se ha extendido la aplicación de la tomografía a otros campos. En medicina se emplea para obtener imágenes detalladas del interior del cuerpo humano, a partir de rayos X que lo cruzan en muchas direcciones. En sismología, las primeras aplicaciones de las técnicas de tomografía se deben a K. Aki, A. Christofferson y E. S. Husebye en 1976. La metodología consiste en observar, en un número grande de estaciones, ondas sísmicas generadas por muchos terremotos, de modo que los rayos crucen, en múltiples direcciones, la parte de la Tierra que se desea estudiar.

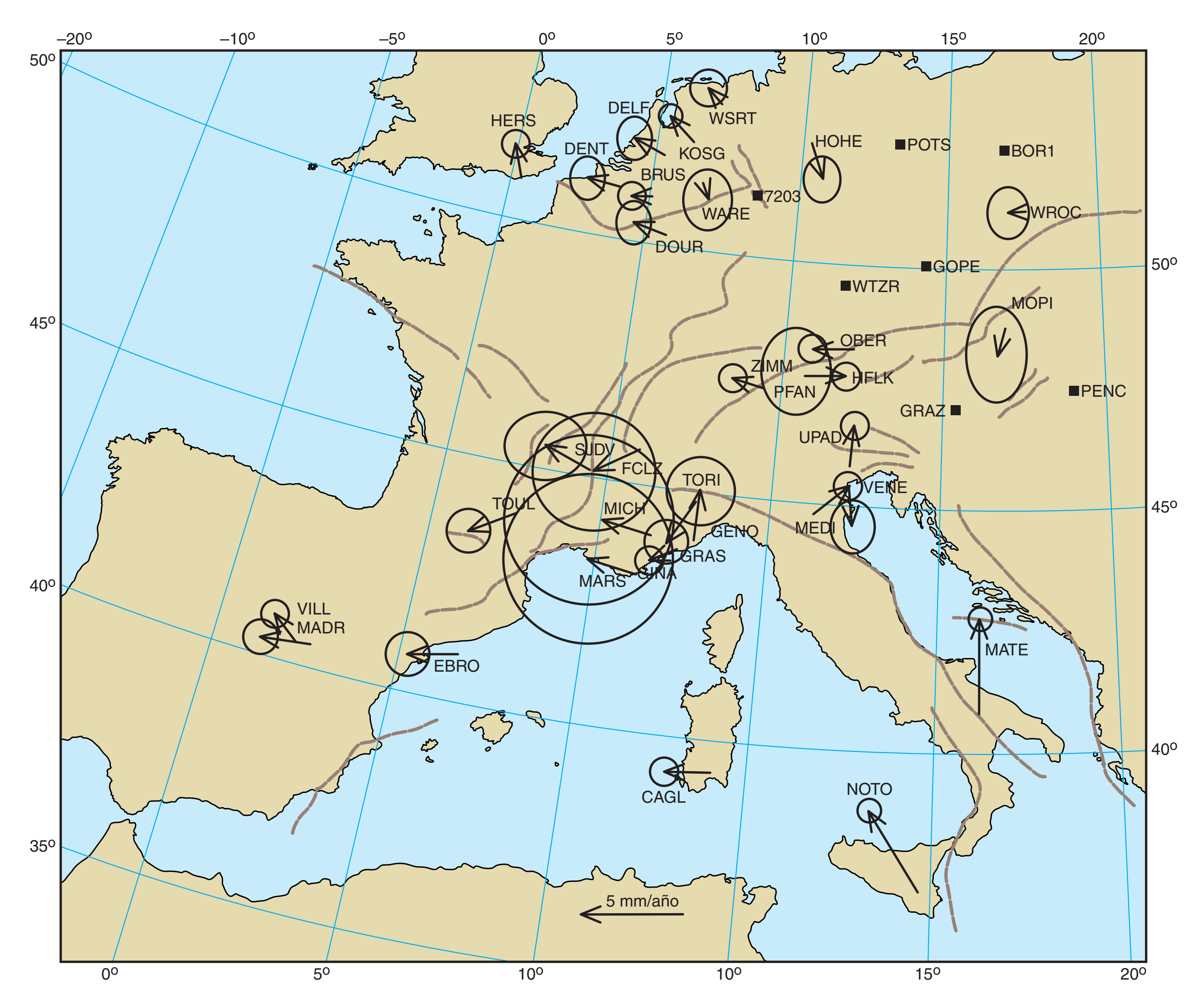
Supongamos que queremos estudiar el manto terrestre subyacente bajo una zona determinada. Debemos entonces distribuir un conjunto de estaciones sobre la zona, y observar en ellas rayos que crucen todo el manto en diversas direcciones, provenientes de muchos terremotos. De esta forma, midiendo la diferencia entre los valores de las observaciones y los deducidos teóricamente de un modelo preliminar, se extraen las diferencias entre la situación real y el modelo.

Esta metodología utilizaba, al principio, sólo los datos de los tiempos de llegada de las ondas, generalmente de las ondas P, pero se ha extendido también a sus amplitudes, y a los tiempos y amplitudes de otros tipos de ondas, como las superficiales. Los métodos tradicionales operaban sólo con una o dos dimensiones; se limitaban a conocer la distribución de los parámetros de la Tierra con la profundidad, o a lo más a lo largo de cortes longitudinales. La metodología de la tomografía sísmica permite obtener modelos en tres dimensiones del interior de la Tierra.

En general, pues, estos modelos representan estructuras tridimensionales. Se definen a partir de un modelo en el que los parámetros dependen sólo del radio, y nos proporcionan las anomalías, es decir, las diferencias entre los valores en cada punto y los del modelo. Por ejemplo, en el caso de que utilicemos la velocidad de las ondas P, se parte de un modelo en el que ésta depende sólo del radio. A través



2. ESQUEMA DEL MOVIMIENTO de las placas litosféricas en dos bordes, uno de extensión (dorsales oceánicas), en el que las placas se separan creándose nuevo suelo oceánico, y otro de subducción (cadenas montañosas y arcos de islas), en el que las placas chocan entre sí; la litosfera oceánica se introduce por debajo de la continental. Las flechas marcan el movimiento de las placas. La velocidad de las placas varía entre 1 mm y 8 cm por año.



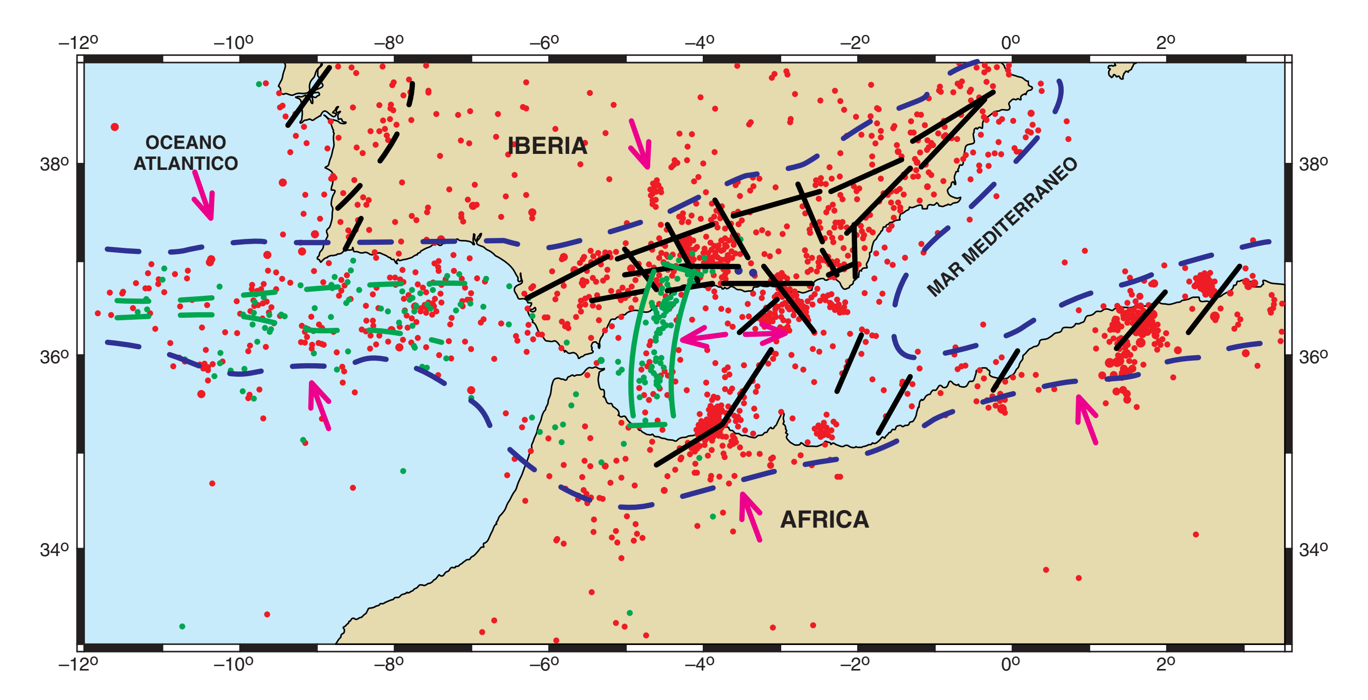
3. VECTORES DE VELOCIDADES medidos en Europa por técnicas de geodesia espacial GPS (Global Positioning System). Las velocidades varían entre 1 y 5 mm por año. [Tomado de J. M. Nocquet, E. Calai, Z. Altamimi, P. Sillard y C. Boucher, 2001. Intraplate deformation in Western Europe deduced from analysis of the ITRF97 velocity field. *Jour. Geophys. Res.* 106, 11.239-11.258. (Copyright 2001, American Geophysical Union.)]

del análisis tomográfico, se obtienen, para cada punto, anomalías positivas o negativas, es decir, regiones donde la velocidad es mayor o menor que la dada por el modelo. El resultado es un mapa tridimensional de las zonas donde las velocidades son mayores o menores.

Puesto que la velocidad de las ondas está relacionada con la rigidez del medio, velocidades mayores indican zonas de mayor rigidez y velocidades menores menor rigidez o mayor viscosidad. Podemos también relacionar estas anomalías con la temperatura, ya que las partes más rígidas y de mayor velocidad corresponden a regiones más frías, y las de menor velocidad a regiones más calientes. En consecuencia, las imágenes tomográficas tridimensionales del interior de la Tierra se hallan asociadas con imágenes tridimensionales de la distribución de la temperatura.

Por otro lado, sabemos que el interior de la Tierra está a mayor temperatura que su superficie. Cabe, pues, que en su interior se produzcan corrientes de convección térmica. Estas corrientes son las que se producen en un recipiente de agua cuando se calienta por debajo. El agua caliente tiene menor densidad y asciende a la superficie. Allí, el agua se enfría y, al aumentar, su densidad empieza a descender otra vez hasta el fondo. Se establecen unas células de convección con corrientes ascendentes de agua caliente y descendentes de agua fría.

Se trata de un fenómeno que se aprecia lo mismo en el interior del manto, donde la diferencia de temperatura entre su parte más profunda y la más superficial es de unos 2000 ºC, que en el interior del núcleo externo, donde la diferencia es de unos 1000 ºC. En el caso del manto el material es sólido, aunque tiene cierta plasticidad, que permite pequeñas velocidades de unos centímetros por año, mientras que el material del núcleo externo es fluido y en él las velo-



4. MOVIMIENTO DE LAS PLACAS de Eurasia y Africa, en el borde sur de la Península Ibérica (Iberia). La zona entre las líneas azules corresponde a la zona de deformación en la que se producen los terremotos. Los puntos rojos corresponden a terremotos superficiales (profundidad menor de 30 km) y los verdes a terremotos más profundos (entre 30 y 150 km de profundidad). Los puntos azules son los terremotos de 630 km de profundidad. La zona marcada en verde corresponde a una zona de subducción. Las flechas indican el sentido del movimiento de colisión entre Africa e Iberia y de extensión este-oeste en el mar de Alborán. La velocidad del movimiento de las placas medida a partir de los terremotos del siglo XX varía entre 5,5 mm por año en el Golfo de Cádiz, 0,6 mm por año en las Béticas y 2,7 mm por año en Argelia.

cidades son mayores, hasta algunos centímetros por minuto.

Las imágenes de regiones calientes del interior del manto y el núcleo de la Tierra se relacionan con las corrientes de convección ascendentes; las imágenes de regiones frías, con las descendentes. De esta forma, las hipótesis sobre la existencia de tales corrientes se confirman con las observaciones. Las imágenes tomográficas nos proporcionan, por lo tanto, un cuadro de la distribución de las corrientes de convección en el interior de la Tierra. De ellas se puede obtener su relación con los continentes y océanos y con la situación de las grandes cadenas montañosas.

La tectónica de placas postula la existencia de zonas de subducción, donde la litosfera más fría se introduce dentro del manto, y de zonas de extensión, donde aflora a la superficie material caliente desde el interior. Estas dos zonas se han identificado con corrientes de convección descendentes y ascendentes. Los resultados de la tomografía sísmica han confirmado experimentalmente las hipótesis.

Movimiento en tiempo real de los continentes

La teoría de la tectónica de placas, que se desarrolló hacia los años sesenta, venía a dar la razón a un incomprendido Alfred Wegener, que ya en 1912 había propuesto la deriva de los continentes. A partir de numerosas observaciones de geofísica, geodesia y geología quedó establecido en esta teoría que la litosfera terrestre, la capa más rígida de la superficie de la Tierra con un espesor de 100 kilómetros, se divide en placas, con siete principales, que se desplazan con un movimiento relativo de una velocidad entre 1 y 8 cm por año.

Hace unos 180 millones de años los continentes conformaban un solo supercontinente, la Pangea de Wegener. Desde entonces se han ido rompiendo y separando, hasta su reparto actual. El océano Atlántico, que no existía hace 180 millones de años, se ha formado al separarse América de Eurasia y Africa. El mecanismo del movimiento de los continentes, que Wegener nunca pudo explicar correctamente, recibe ahora explicación con la teoría tectónica, al ser las capas litosféricas, sobre las que están situados los continentes, las que se mueven. Las placas no coinciden con los continentes, sino que tienen parte continental y parte oceánica. Pueden moverse porque debajo de la litosfera se encuentra una capa semiviscosa, la astenosfera o capa débil, que permite el deslizamiento sobre ella de la litosfera. En los bordes de las placas se produce la mayoría de los terremotos.

Precisamente el movimiento de las placas es el que da origen a estos fenómenos. En sus bordes las placas se separan, chocan o se deslizan horizontalmente, unas respecto a otras. Estos tres procesos determinan los tres tipos principales de límites de placas. Por ejemplo, en la dorsal centroatlántica la placa de América se separa de la de Eurasia, continuándose la aper-

tura de este océano; a lo largo del Mediterráneo esta última placa choca contra la de Africa, produciéndose poco a poco el cierre de nuestro mar.

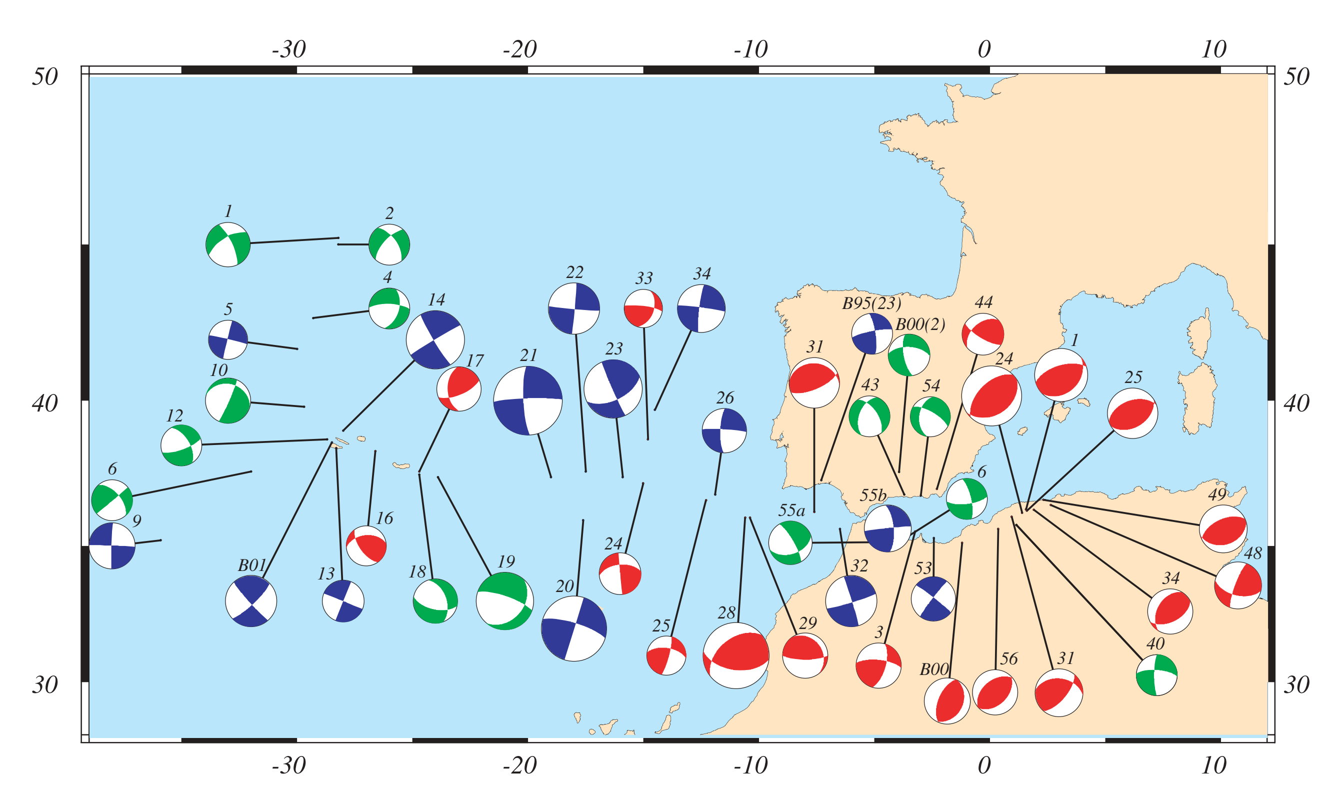
Hasta muy recientemente, el movimiento de las placas sólo podía determinarse a partir de otras observaciones, pero no de una forma directa. Para el pasado geológico, el movimiento quedaba patente por el estudio del magnetismo de las rocas o paleomagnetismo. El registro magnético de rocas imanadas en el pasado, pertenecientes a diversos continentes, pone de manifiesto que su situación relativa actual no corresponde con la que tuvo tiempo atrás. Por ejemplo, el estudio paleomagnético de rocas de Eurasia y América del Norte nos descubre que estos dos continentes estuvieron unidos en el pasado, para irse luego distanciando. Conociendo el tiempo en que estaban unidos y su distancia actual deducimos la velocidad media de su desplazamiento, cifrada en unos 6 cm por año.

Para medir la velocidad actual de desplazamiento se recurre a los terremotos acaecidos en un borde de placas. Con ese fin, se suman los desplazamientos, que se producen en cada terremoto, para todos los terremotos, durante un número de años suficientemente grande. Dividiendo por el número de años, se obtiene el desplazamiento anual, es decir, su velocidad. Este método supone que el movimiento de las placas se da sólo en forma brusca produciendo terremotos, lo que se conoce como movimiento cosísmico.

Sin embargo, puede ocurrir que las placas se muevan unas respecto a otras, no sólo en virtud de sacudidas bruscas o terremotos, sino también por un deslizamiento lento plástico sin relación con tales episodios. En este caso, sumando todos los terremotos, no obtendríamos el valor correcto de la velocidad, sino otro menor.

Ante esta situación, la solución está en medir directamente el movimiento relativo de las placas. Sabemos de qué orden es su velocidad, es decir, entre milímetros y unos ocho centímetros por año. Necesitamos, pues, medir la distancia entre dos puntos a un lado y otro del borde de placas con una exactitud semejante, operación repetida a lo largo de varios años. Pero medir distancias grandes con exactitud de menos de un centímetro no era, hasta hace muy poco, posible. Las medidas geodésicas por triangulación son muy laboriosas para llegar a ese nivel de precisión, y tendrían que repetirse en períodos largos de tiempo para apreciar su cambio. Las medidas modernas de geodesia espacial, a las que nos hemos referidos al principio, permiten determinar, prácticamente en tiempo real, la velocidad de las placas.

Desde hace unos veinte años se dispone de la técnica de medidas de interferometría de grandes bases (VLBI, de *V*ery *L*ong *B*ase *I*nterferometry). Requiere el despliegue de grandes antenas parabólicas, que registran señales procedentes del espacio, de los cuásares por ejemplo. Gracias a esa técnica nos es dado medir con mucha exactitud la distancia entre dos antenas.



5. MECANISMO de los terremotos superficiales (h < 30 km) de magnitud mayor que 5 de la región Azores-Túnez del período 1930-1999. En azul los mecanismos de falla de desgarre, en verde los de fallas normales y en rojo los de fallas inversas. Los primeros corresponden a zonas de deslizamiento horizontal, los segundos a zonas de extensión y los terceros a zonas de colisión (cortesía de E. Buforn).

Repitiendo las medidas a lo largo de varios años, puede determinarse el movimiento relativo entre ellas.

Pero ese tipo de antenas sólo existen en muy pocos sitios. En la práctica resulta más útil el sistema GPS. Los detectores GPS son aparatos pequeños, de fácil transporte y preparados para realizar campañas de medidas en muchos puntos. Las medidas dan la posición de cada punto con una exactitud de milímetro referida a un sistema fijo de referencias. La repetición de estas medidas permite en pocos años determinar, a través de un análisis muy riguroso y bastante complicado, el campo de velocidades relativas de una cierta región, en forma de vectores, que dan la magnitud del desplazamiento anual y su dirección. Con la precisión creciente de las medidas del sistema GPS, aumenta también la precisión de nuestras medidas de la velocidad del movimiento de las placas. Por ejemplo las deformaciones en el interior de Europa medidas directamente por estos métodos varían entre 2 y 5 mm por año.

En las zonas de actividad sísmica, la interacción tectónica de las placas produce deformaciones de la corteza terrestre que terminan por desencadenar los terremotos. Hasta hace muy poco, sólo se podía calcular de una manera aproximada la deformación de una región, teniendo en cuenta el tiempo que ha pasado desde el último gran terremoto y el valor, asimismo aproximado, de la velocidad de las placas. Por ejemplo, en el sur de España, sumando todos los desplazamientos producidos por los terremotos del siglo XX se obtienen velocidades respecto a Africa entre 0,6 y 5,5 mm por año.

Las observaciones de GPS abren la posibilidad de medir directamente tales deformaciones. La comparación entre los resultados registrados y los deducidos de observaciones sísmicas permite separar la deformación que se transforma en el deslizamiento de los terremotos y la deformación que produce un deslizamiento lento no sísmico. La medición directa de las deformaciones de la corteza terrestre, además de su interés para estudiar la tectónica activa de una región, tiene también consecuencias prácticas en la evaluación del riesgo sísmico.

Conclusión

Los últimos 25 años han supuesto un gran adelanto para nuestro conocimiento de la Tierra y sus envolturas, océanos y atmósfera, y de los procesos que en su seno tienen lugar. Los avances han sido posibles gracias al desarrollo de nuevos instrumentos y métodos de observación y la utilización de ordenadores de potencia creciente. Hasta hace muy poco, las limitaciones del cálculo reducían nuestros modelos de la Tierra a representaciones muy sencillas, definidas por un número exiguo de parámetros. Estos modelos no podían reproducir la complejidad de las situaciones de la Tierra con fidelidad.

Hoy podemos abordar dicha complejidad con métodos de observación y cálculo que nos permiten elaborar modelos realistas. Además del interés teórico intrínseco de los modelos obtenidos, su aplicación facilita la determinación del riesgo de los terremotos y la influencia de la contaminación. Hoy en día, cuando somos más conscientes que nunca de la influencia del hombre en el delicado sistema de la Tierra, su conocimiento profundo se hace imprescindible para establecer las pautas que aseguren su conservación.

Bibliografía complementaria

THE EVOLVING CONTINENTS. B. F. Widley. John Wyley & Sons, Nueva York; 1995.

SEISMIC MODELLING OF THE EARTH STRUCTURE. Dirigido por E. Boschi, G. Ekström y A. Morelli. Editrice Compositoi, Bolonia; 1996.

EARTH'S DEEP INTERIOR. Dirigido por D. J. Crossley. Gordon & Breach Science Publ., Amsterdam; 1997.

GPS FOR GEODESY. Dirigido por P. J. G. Teunissen y A. Kleusberg. Springer Verlag; 1998.

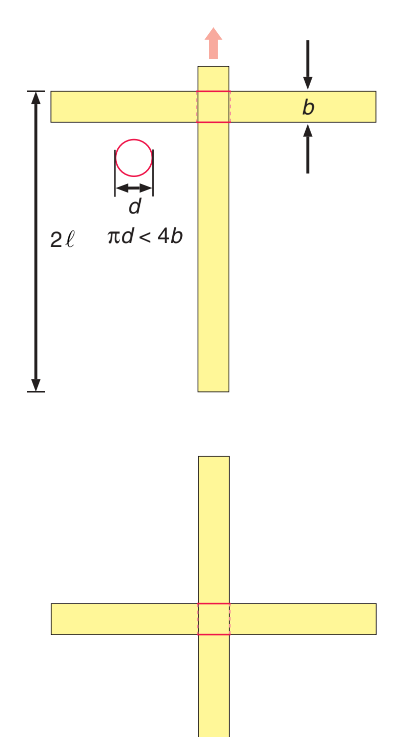
EARTH. EVOLUTION OF A HABITABLE WORLD. J. I. Lunine. Cambridge University Press; 1999.

Wolfgang Bürger

El vuelo del bumerán

Los prototipos de bumerán tradicionales son objetos voladores, hechos de madera, con dos superficies de sustentación que forman un ángulo más o menos obtuso. Hace unos cuatro siglos, los aborígenes transmitieron este legado a los colonos australianos de raza blanca, como muestra del progreso técnico de una sociedad de la edad de piedra. La mayoría, utilizados para la caza, son pesados ("kylies"); ni con toda la práctica del mundo volverán éstos al punto de partida. Pero alcanzan más de 100 metros, si en el camino no matan un animal o encuentran algún obstáculo.

Los deportivos y lúdicos tienen unas superficies de sustentación algo más angulares. Según el peso por superficie (cantidad de masa por superficie alar) y la calidad aerodinámica de sus superficies de sustentación vuelven a su lanzador en vuelos circulares de unos 10 hasta 40 metros, siempre que se hayan lanzado con cierta habilidad. Los hay de diferentes formas y tamaños.



El bumerán de dos alas, fácil de tallar en un trozo de madera, tiene un movimiento complicado, ya que su baricentro está por regla general en el ángulo fuera de la madera, gira alrededor del bumerán y viceversa. Los movimientos del baricentro y del bumerán se superponen de tal manera que cada punto de la madera describe curvas al estilo de las cicloides en forma de ondas o rizos. Felix Hess, quien en 1968 escribió un artículo en *Scientific American* y en 1975 una disertación impresionante sobre bumeranes, hizo visible las trayectorias de vuelo en un cielo nocturno por medio de un rastro luminoso que dejaba una bombillita cargada mediante una batería, que iba montada cerca de la punta de un ala.

Por simplicidad nos ceñiremos al bumerán cruciforme, de vuelo más tranquilo con el baricentro justo en el centro. Se trata de un tipo poco habitual entre los aborígenes, lo que se explica por su difícil fabricación con una técnica lítica. En el museo de la ciencia de St. Paul (Minnesota) pude admirar algunos ejemplares del noreste de Australia, cuyas alas cruzadas se unieron trenzando ingeniosamente cuerdas de cuero.

Bumerán de cartón

Como objeto, a la vez, de entretenimiento y de contemplación me detendré en un modelo de sencillez insuperable. Retorna y, para dar una vuelta completa, le basta con la amplitud de una oficina. A Michael Siems, campeón de lanzamientos de bumerán, le debo el modo de confeccionarlos con un par de tiras de cartón, recortadas de los antiguos archivadores de documentos. Tómense dos tiras de cartón con un peso de 300 gramos por metro cuadrado y un tamaño de 21 cm × 2 cm. Con una goma elástica casera (diámetro de 1,5 cm) se unen formando una cruz simétrica. Puesto que sólo podemos estirar la goma hasta cierto punto, se monta el centro de una tira con el extremo de la otra; a continuación se empuja la segunda tira hasta llegar al centro. Una grapa bien colocada podría substituir la goma. Para que el bumerán siga la curva proyectada para su vuelo, deben doblarse las cuatro alas en la dirección deseada antes del lanzamiento.

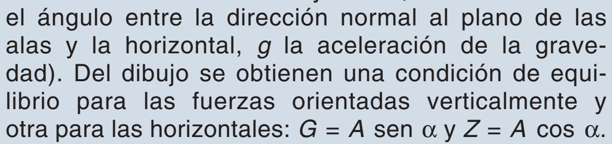
Al principio, el diestro tomará la cruz alada con su mano derecha verticalmente o muy ligeramente inclinado hacia la derecha, el lado "vacío" hacia la izquierda, y lanzará el bumerán hacia delante o en leve pendiente hacia arriba. (Los zurdos deben intercambiar aquí y en lo que sigue izquierda y derecha.) Deteniendo la mano justo antes de soltarlo, le imprimimos un gran impulso de rotación y, en comparación, poco impulso hacia adelante. Si el bumerán pesa mucho, necesitará poca inclinación hacia la derecha para elevarse desde el principio en virtud de las fuerzas ascensionales; para los bumeranes de cartón ligeros de cuatro alas la inclinación es superflua.

Felix Hess señala lo que a continuación ocurre: "Primero parece que el bumerán se aleje volando en línea recta, pero enseguida gira hacia la izquierda y también hacia arriba y vuelve con un arco muy abierto hasta el lanzador. En algún punto cercano al lanzador se

TEORIA DEL VUELO DEL BUMERAN

Giróscopos y planeadores al mismo tiempo

Un bumerán lanzado hacia delante en posición vertical inclina de salida el plano de sus alas y vuela describiendo una curva que está aproximadamente en un plano horizontal. Por las observaciones de Hess comprobamos que el plano de las alas es siempre tangencial a la trayectoria de vuelo. (Un bumerán que hubiera diferido de este tipo de orientación habría sido empujado por las fuerzas de resistencia del aire hacia la posición “correcta”.) La fuerza ascensional A de las alas, orientada perpendicularmente al plano de las alas, se halla en equilibrio con la fuerza centrífuga $Z = mv^2/r$ y la fuerza de la gravedad $G = mg$ (m y v son la masa y la velocidad del baricentro del bumerán, r el radio de curvatura local de su trayectoria, α el ángulo entre la dirección normal al plano de las alas y la horizontal, g la aceleración de la gravedad). Del dibujo se obtienen una condición de equilibrio para las fuerzas orientadas verticalmente y otra para las horizontales: $G = A \operatorname{sen} \alpha$ y $Z = A \cos \alpha$.



Barger y Olsson han calculado qué fuerza ascensional A experimenta un bumerán de cruz cuando su baricentro se aleja con una velocidad v en el plano de las alas y sus cuatro alas giran con una velocidad angular ω en el plano de éstas. Para el cálculo se admite que todas las partes de las alas contribuyen en la fuerza ascensional del bumerán y que sus aportaciones son proporcionales al cuadrado de las velocidades de la corriente de ataque:

$$A = \frac{m}{L}\left(\frac{u^2}{3} + \frac{v^2}{2}\right)$$

donde $u = \omega\ell$ es la velocidad de la trayectoria circular de la punta de las alas y ℓ la longitud de las alas. El parámetro $L = 2Q/(\rho c_a)$, que tiene dimensión de longitud, aparte de la densidad del aire ρ depende sólo de características del bumerán: del coeficiente de sustentación c_a de sus alas y del peso por superficie $Q = m/(4b\ell)$, la razón entre la masa m y la superficie alar $4b\ell$ (para un bumerán de cuatro alas de anchura b). Para un bumerán de oficina de $m = 2{,}5$ gramos con $\ell = 10{,}5$ cm y $b = 2$ cm, L será aproximadamente 1,2 metros, si para c_a se supone un valor de 0,5.

El momento de giro de las fuerzas ascensionales del aire lo elude el bumerán a la manera del giroscopio: gira el plano de sus alas con una velocidad angular $\Omega = v/(L \cos \alpha)$ alrededor del eje vertical que pasa por su baricentro. Admitido que el plano de las alas es siempre tangencial a la curva de la trayectoria, se deduce que la curva de la trayectoria de un bumerán sigue el giro del plano de sus alas: $v = r\Omega$. Por eliminación de Ω se infiere de las dos últimas ecuaciones que $r = L \cos \alpha$.

A diferencia de la velocidad de precesión Ω, el radio local de la trayectoria no depende de la velocidad v del bumerán. Este no vuela más lejos porque se lance con más fuerza, sino sólo irá y girará más deprisa.

La resistencia del aire frena la rotación: u disminuye y con ello también la fuerza ascensional A. Ya que $G = A \operatorname{sen} \alpha$ permanece constante, α tiene que aumentar: el bumerán se tumba. Debido al factor L, r crece con el peso por superficie del bumerán (“bumeranes pesados siguen volando”) y deviene (debido al factor $\cos \alpha$) menor cuanto más se haya tumbado el plano de las alas.

Si se eliminan de las ecuaciones de arriba las magnitudes A, α y r, obtendremos

$$v^2 = 2gL\sqrt{\left(\frac{u^2}{3gL}\right)^2 - 1}$$

y con ello también todas las otras magnitudes (A, $\operatorname{sen} \alpha$ y así sucesivamente) en función de u. Para volar, ha de empezar con una velocidad de giro suficientemente grande $u_0 > \sqrt{3gL}$. Las ecuaciones son válidas hasta que se cumpla que $u = \sqrt{3gL}$ y la velocidad $v = 0$ y el bumerán haya alcanzado el centro de la trayectoria espiral ($r = 0$), girando con la velocidad angular $\omega = \sqrt{3gL}/\ell$. El plano de sus alas está entonces dispuesto horizontalmente ($\alpha = \pi/2$), y la fuerza ascensional aún puede aguantar su peso ($A = G$). Si se continúa reduciendo u, el juguete descenderá de inmediato, de un modo parecido al aterrizaje de un helicóptero.

Mientras la resistencia del aire frena la velocidad de giro u del bumerán volador, aumenta el parámetro adimensional $\tau = \sqrt{3gL}/u$. Desempeña la función de un tiempo que ordena el transcurrir del vuelo del bumerán. El verdadero transcurrir temporal en segundos resulta de una ecuación diferencial para el frenado del bumerán debido a la resistencia del aire. Sin resolver esta ecuación, podemos estimar con su ayuda el tiempo del vuelo. Este depende sólo de las propiedades aerodinámicas del bumerán; para un prototipo ligero no llega a los dos segundos. Crece, como la longitud L, con el peso por superficie: cuanto más pesado sea el bumerán, más tiempo durará su vuelo.



Si lanzamos varios bumeranes conjuntamente retornan también en formación, siempre que no sople el viento, por supuesto

para o describe un segundo rizo más pequeño, antes de caer al suelo. El plano de las alas adquiere una posición tendente a la horizontal, casi absoluta al final del vuelo.”

El retorno del bumerán

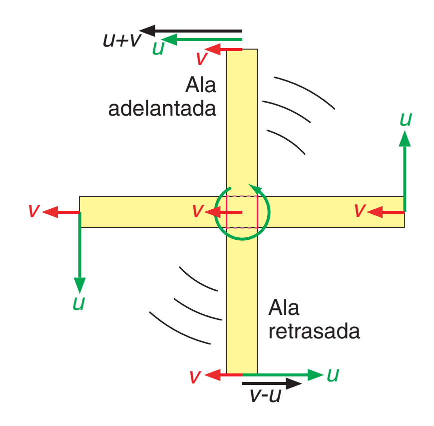
Toda teoría física que se proponga para explicar el vuelo del bumerán ha de ofrecer respuesta a tres cuestiones clave: ¿Por qué vuelve el bumerán y cuál es el diámetro de la trayectoria de vuelta? ¿Qué proceso frena su vuelo hasta detenerlo? ¿Por qué siempre acaba en posición horizontal?

Vayamos con la primera. Un bumerán es tanto un planeador como un giróscopo. Sus brazos son alas que experimentan una fuerza en su movimiento hacia adelante y giro a través del aire. La componente perpendicular al viento de marcha se llama “fuerza ascensional”, aun cuando en nuestro caso no esté dirigida hacia arriba (*véase el recuadro* “Giróscopos y planeadores al mismo tiempo”). La fuerza ascensional empuja un bumerán lanzado por diestros a una curva hacia la izquierda. Simultáneamente actúa un momento de giro que quiere volcar el bumerán alrededor del eje de su dirección de vuelo; el ala que gira hacia delante experimenta un viento de marcha y una fuerza ascensional correspondientemente mayor que la que va hacia atrás.

A la manera de un giroscopio, elude ese momento de rotación mediante un giro (“precesión”) de su plano de vuelo. El bumerán retorna como consecuencia del movimiento en su trayectoria y de la precesión giroscópica. La experiencia nos enseña que la anchura del vuelo apenas depende de la velocidad de lanzamiento; sí en cambio la velocidad de vuelo y la velocidad angular, con la que el juguete gira durante su vuelo.

Respondamos a la segunda cuestión. Planeadores y aviones de papel realizan también un trabajo para vencer la resistencia del aire. Pero unos y otros pueden en su vuelo de descenso convertir la energía potencial de la gravedad en energía cinética y, por lo tanto, planear en declive hasta que terminen en el suelo. En cambio el bumerán pierde parte de su energía cinética en forma de trabajo para vencer la resistencia del aire. Por lo tanto, su vuelo acaba tras un tiempo limitado.

Pese a su empeño, Hess no ha encontrado una respuesta concluyente a la pregunta sobre el origen de su inclinación hasta alcanzar una posición horizontal. Expertos y aficionados, que atrapan los bumeranes en su vuelo de retorno, corroboran que el plano de las alas siempre se inclina hacia la posición horizontal. La gravedad ha de ser, pues, la causa de que se sitúen así. En vez de acometer un vuelo de descenso, el bumerán busca la horizontal y aumenta con ello la parte orientada hacia arriba de su fuerza ascensional.



Una omisión en el Laboratorio Espacial

No está a nuestro alcance desactivar la fuerza de la gravedad en la Tierra. Pero donde no opera la gravedad —en una estación espacial que describe una trayectoria balística— los bumeranes no deberían adoptar una posición horizontal. En el programa “Juguetes en el espacio” incluido en el vuelo del *Discovery* de 1984 podrían haberlo probado los astronautas. Al no hacerlo, se perdió una oportunidad de oro.

Bibliografía complementaria

THE AERODYNAMICS OF BOOMERANGS. Felix Hess, en *Scientific American*, pág. 124; noviembre, 1968.

CLASSICAL MECHANICS, A MODERN PERSPECTIVE. V. D. Barger y M. E. Olsson. McGraw-Hill, pág. 171 (The Boomerang). Nueva York, 1973.

BOOMERANGS, AERODYNAMICS AND MOTION. Felix Hess. Disertación, Rijksuniversiteit te Groningen, 1975.

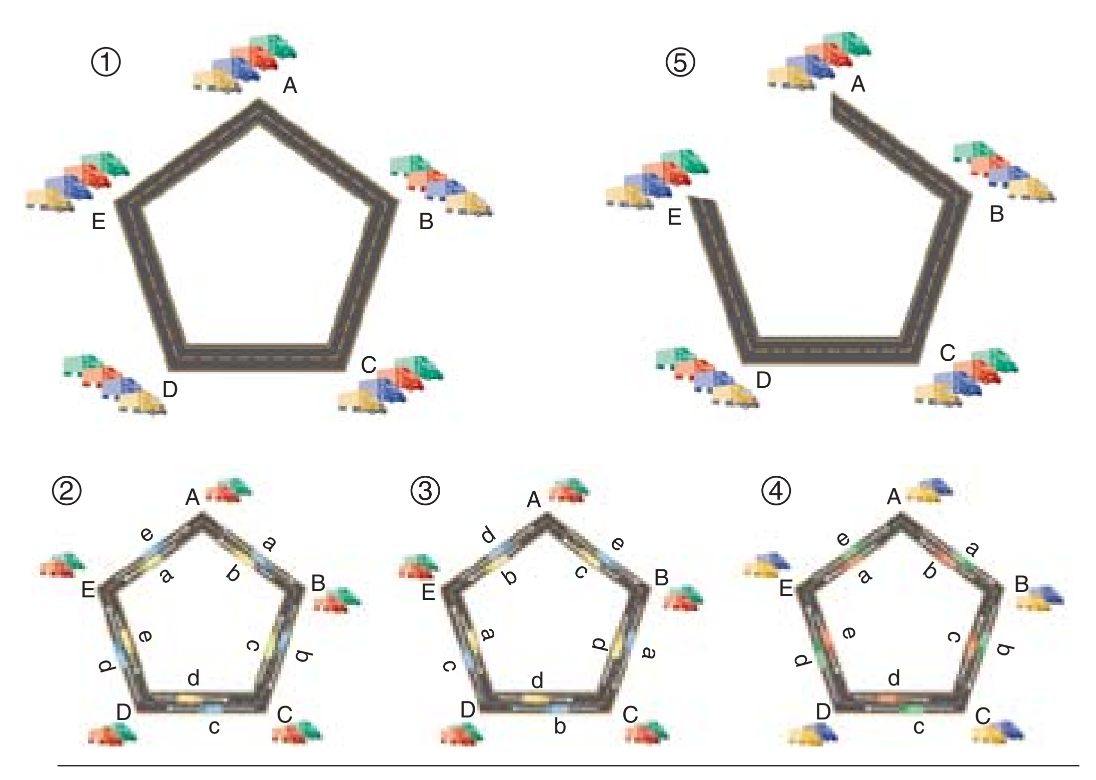
Dennis E. Shasha

Parada discrecional

En un país europeo, renombrado por sus artistas, sus vinos y sus revoluciones, un grupo de camioneros dio con la forma de lograr precios más bajos en el combustible. Sencillamente, bloquearon las carreteras y desafiaron a que los sacasen de allí. Este problema está dedicado a ellos.

Consideremos una red pentagonal de carreteras de doble vía que conectan los vértices del pentágono (*véase la figura*). Supongamos que un camión puede viajar en un minuto desde un vértice hasta otro contiguo. Mientras lo hace, ningún otro vehículo puede usar la misma vía en ninguno de los dos sentidos. En este problema, cuatro camiones de reparto parten de cada vértice. Cada vehículo ha de viajar después hasta uno de los otros cuatro vértices; por ejemplo, los cuatro camiones que salen del vértice A tienen que acabar uno en cada uno de los vértices B, C, D y E. Como problema preliminar, ¿será posible idear una ruta en la que cada camión alcance su destino en un máximo de tres minutos? Se puede ver una solución en las figuras 1 a 4.

Pero el problema se complica cuando los transportistas se declaran en huelga, en el fragor de la cual uno bloquea las dos vías que conectan los vértices A y E (*paso 5 de la figura*). En ese caso, ¿en qué tiempo mínimo se puede conseguir que los vehículos de reparto alcancen sus destinos? ¿Se podrá demostrar que tal solución es la más rápida de las posibles?



DE CADA VERTICE del pentágono (*1*) parten 4 camiones. Durante el primer minuto, uno de los camiones de cada vértice viaja en sentido horario por la vía exterior, al tiempo que otro camión de cada vértice lo hace en sentido antihorario por la vía interior (*2*). En el segundo minuto, los camiones, tanto en la vía exterior como en la interior, continúan viajando en sentido horario para llegar a sus destinos (*3*). En el tercer minuto, uno de los dos camiones que todavía están en cada vértice viaja en sentido horario por la vía exterior, mientras que el otro lo hace en sentido antihorario por la vía interior (*4*). La solución funciona también si se invierten todos los sentidos de recorrido. Pero, ¿qué ocurre si algunas de las vías están bloqueadas (*5*)?

Solución del problema del mes pasado:

Para hacer máximas las probabilidades de supervivencia, cada prisionero se atiene a esta regla: “Si veo dos coronas rojas, diré que la mía es azul, y si veo dos coronas azules, diré que la mía es roja. En los demás casos, pasaré.”
Es seguro que siempre habrá al menos dos coronas rojas o dos azules.
Si hay al menos dos rojas, se plantean cuatro posibilidades:

1. Sólo A y B son rojas. Entonces A y B pasarán. Entonces C dirá azul. Acierto.
2. Sólo B y C son rojas. B y C pasan. A dirá azul. Acierto.
3. Sólo A y C son rojas. A y C pasan. B dirá azul. Acierto.
4. A, B y C son rojas. Todos dirán azul, y todos habrán fallado.

En el caso de que dos coronas por lo menos sean azules se aplica un razonamiento análogo. Así pues, la regla asegura que los prisioneros ganarán el 75 por ciento de las veces. Si éstos pueden apostar distinto número de puntos, deberían acordar de antemano quiénes apostarán en primer, segundo y tercer lugar. El primero debería siempre apostar un punto a que su corona es roja. Si el segundo ve que la corona del primero es azul, debería apostar dos puntos a que la suya es roja; si no, debe pasar. Si el tercero de los cautivos observa que las coronas de los otros dos son ambas azules, debe apostar cuatro puntos a que la suya es roja; de no ser así, debe pasar.
A menos que los tres presos lleven coronas azules (lo que ocurre en 1 de cada 8 casos), los prisioneros ganarán.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Información y juegos de azar: el problema de Monty Hall y la paradoja de los dos sobres

La forma en que se añade información a una situación incierta puede dar lugar a enigmas y paradojas. Un ejemplo ya clásico en la teoría de la probabilidad es el problema de Monty Hall. Otro no tan conocido, aunque no menos interesante, es la paradoja de los dos sobres, que presentaremos en este artículo pero a la que dedicaremos una exposición detallada en el próximo.

Monty Hall es el presentador de un viejo concurso de la televisión en Estados Unidos. En la fase final del concurso Monty enseña tres cofres a un sufrido concursante. En uno de ellos hay un gran premio y los otros dos están vacíos. El concursante elige nervioso uno de los cofres. Monty aparta entonces el cofre elegido y mira lenta y teatralmente en el interior de los otros dos. Cierra de nuevo uno de ellos, toma el otro con las dos manos y lo vuelca ante los ojos del concursante y el público: está vacío.

El concursante suspira aliviado, aunque no tiene ninguna razón para ello. Monty, generoso, le enseña los dos cofres que quedan cerrados y le ofrece la posibilidad de reconsiderar su decisión inicial: "Puede ahora escoger cualquiera de ellos", anuncia con un redoble de batería. ¿Qué debería hacer el concursante?

Mucha gente piensa que, una vez eliminado uno de los cofres, el premio puede estar por igual en los dos que quedan. Por lo tanto, no importa el cofre que se elija: la probabilidad de ganar el premio es del 50 %. Si a eso añadimos que, en la mayoría de la gente, modificar una decisión correcta produce una sensación bastante más dolorosa que mantenerse en una incorrecta, no es de extrañar que casi todo el mundo se niegue a cambiar de cofre. En una serie de charlas sobre probabilidad escenifiqué el concurso de Monty Hall y todos los "concursantes" sin excepción prefirieron quedarse con el cofre elegido en primer lugar.

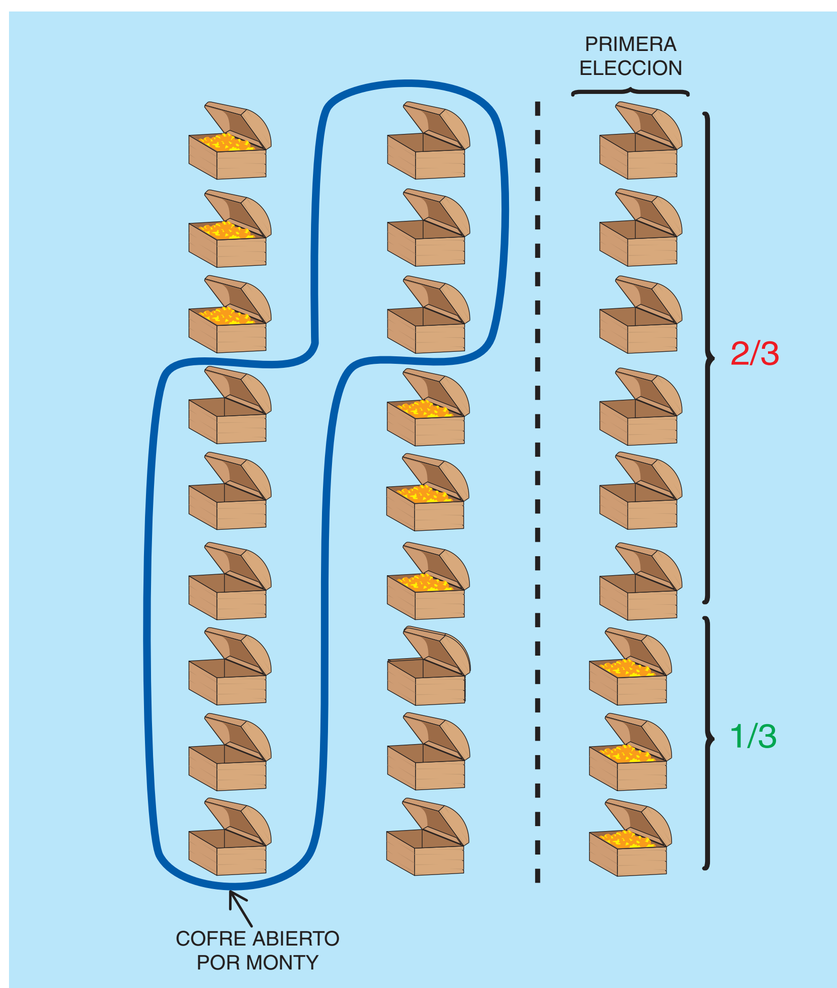
Sin embargo, lo mejor que puede hacer el concursante es cambiar su decisión inicial. Veamos por qué. Conviene primero que se imagine no un solo concurso, sino un gran número de ellos. Imagínese que el concursante tiene oportunidad de repetir el juego 900 veces, es decir, imagínese 900 *réplicas* del concurso, cada una con el premio en un cofre tomado al azar. Cuando el concursante elige por primera vez uno de los tres cofres, es evidente que aproximadamente un tercio de las veces acertará y dos tercios de las veces se equivocará. Es decir, *solamente* en un tercio de las réplicas, unas 300, el premio está en el cofre elegido por el concursante. Monty descubre el cofre vacío y quedan dos cofres cerrados. Recordemos que sólo en un tercio de las réplicas el premio está en el cofre elegido inicialmente. En el resto de las réplicas, el premio estará en el otro cofre.

Por tanto, si el concursante mantiene su decisión inicial, ganará un tercio de las veces. Si cambia, ganará dos tercios de las veces. Este argumento se muestra en la figura, en donde hemos supuesto 9 réplicas del juego. En términos de probabilidad, podemos decir que la probabilidad de ganar manteniendo la decisión inicial es un tercio, y la probabilidad de ganar al cambiar de cofre es de dos tercios. Los dos cofres no son equivalentes, como podía parecer a primera vista. Uno de ellos ha sido tomado al azar entre tres cofres en principio iguales (con igual probabilidad de contener el premio). El otro ha sido el superviviente de la inspección realizada por Monty.

El problema de Monty Hall nos enseña dos cosas interesantes acerca de la probabilidad y el azar. La primera es que, al introducir información en un sistema, cambian las probabilidades de los distintos sucesos que pueden ocurrir en dicho sistema. La segunda es más metodológica: el problema de Monty Hall es más difícil de entender si no se introducen las réplicas, es decir, si se piensa en un único concurso.

Veamos ahora la paradoja de los dos sobres, que tiene una formulación análoga al juego de Monty Hall, pero que da lugar a una situación bastante más sorprendente y cuya solución requiere adentrarse en conceptos más sutiles de la teoría de la probabilidad.

Ahora el presentador toma dos sobres e introduce en uno de ellos una cantidad de dinero x, desconocida para el concursante, y en el otro el doble de dicha cantidad, $2x$. El concursante elige uno de los dos sobres y lo abre. Supongamos que encuentra 1000 euros. El presentador entonces le ofrece al concursante la posibilidad de cambiar su elección original. ¿Cuál es la estrategia a seguir? En principio, los dos sobres parecen equivalentes y, por tanto, nadie creería que cambiar de sobre pueda suponer alguna ventaja. Sin embargo, en el sobre cerrado puede haber 2000 euros o 500 euros. Como no sabemos nada de las cantidades introducidas en los sobres, cada una de estas posibilidades se dará con una probabilidad 1/2. Por consiguiente, en el sobre cerrado habrá, en media, una cantidad 2000/2 + 500/2, es decir, 1250 euros. Si nos quedamos con el sobre abierto ganamos 1000 euros, pero si cam-



EL JUEGO DE MONTY HALL repetido nueve veces. En tres de ellas el concursante ha elegido el cofre premiado en su primera opción; en seis, el concursante elige un cofre sin premio. Después de que Monty abre uno de los cofres no elegidos (los rodeados por la línea azul), los dos restantes no son equivalentes: el elegido en primer lugar contiene el premio sólo un tercio de las veces, mientras que el que ha sobrevivido a la inspección de Monty contiene el premio dos tercios de las veces

biamos ganamos, en media, 1250 euros. La mejor estrategia será, pues, cambiar.

Pero este argumento conduce a una extraña paradoja. El argumento no depende de la cantidad hallada en el primer sobre (supongamos que en él hemos encontrado x euros; en el sobre cerrado habrá, en media, $2x/2 + (x/2)/2 = 5x/4$, que es mayor que x. Es decir, independientemente de lo que encontremos en el primer sobre, si cambiamos aumentaremos la ganancia media. ¿Para qué abrir el primer sobre entonces? Antes de abrirlo ya sabemos que es mejor cambiar. Pero esta conclusión es completamente absurda, porque podemos aplicar de nuevo el argumento, que nos aconseja cambiar otra vez de sobre. Actuaríamos así como el asno de Buridán, alternando indefinidamente nuestras preferencias entre uno y otro sobre. La diferencia con el asno es que el argumento probabilístico que hemos descrito nos estaría diciendo que, cada vez que cambiamos nuestra preferencia de uno a otro sobre, sin necesidad de abrirlos, estamos aumentando la ganancia media. Hay que ser más necio que el asno para creerse semejante cosa.

Es evidente que en el argumento expuesto acerca del contenido del sobre cerrado hay una falacia. ¿Sabrá el lector encontrarla?

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

Interruptores de pérdida a tierra

Esas extrañas tomas de corriente de pared con sus botones de prueba y reconexión se ven cada día más. Ya exigido en algunos países para cuartos de baño, cocinas, garajes y enchufes al aire libre, el interruptor de pérdida a tierra (o GFCI) puede protegernos de desagradables sacudidas eléctricas o de la electrocución.

Acostumbra la gente suponerse protegida por los automáticos y fusibles de los edificios. Pero esos interruptores actúan esencialmente ante cortocircuitos y sobrecargas en las tomas de corriente, que pueden recalentar el cableado eléctrico del edificio y promover un incendio. Los automáticos domésticos comunes no se disparan hasta que la corriente sobrepasa los 15 o 20 ampères, pero una corriente de sólo 0,1 ampère que atraviese un cuerpo humano puede causar un ataque al corazón, asegura Matt Marone, físico de la Universidad de Mercer.

La mayoría de las sacudidas eléctricas caseras se deben a una "pérdida a tierra" en una herramienta o electrodoméstico. Un cable interno suelto o gastado, una salpicadura de agua e incluso una humedad fuerte electrifica el exterior del aparato. Entonces, por el cuerpo de una persona puede pasar corriente hacia tierra, especialmente si esa persona está húmeda y tocando un objeto metálico. Ahí es cuando un GFCI corta la corriente.

La construcción y funcionamiento internos constituyen una elegante aplicación de las leyes fundamentales de la electricidad y el magnetismo. Su acción se inicia cuando la corriente de retorno a la toma de corriente procedente de un aparato eléctrico es menor que la corriente que alimenta a ese aparato, lo cual delata una "fuga" por puesta a tierra. Un GFCI puede detectar fugas de sólo 0,005 ampère e interrumpir la corriente en sólo 1/40 segundos.

Sin embargo, los GFCI no salvan a los mañosillos caseros que enredan en las tomas de corriente sin desconectar el automático. "Si se tocan los hilos negro y blanco con una y otra mano y se está aislado del suelo con unas zapatillas o botas de suela de caucho, las corrientes de ida y vuelta a la toma están compensadas; no hay pérdida a tierra", dice Marone. "Pero podríamos morir porque la diferencia de potencial de 120 volt entre ambos brazos crea una corriente corporal que podría detenernos el corazón." Con la insensatez ni siquiera puede la física.

1. TOMA DE PARED. La corriente llega por el hilo activo (*negro*) y entra en el electrodoméstico por la ranura estrecha del enchufe, para regresar al hilo neutro (*blanco*) por la ranura ancha. Normalmente la intensidad de la corriente es igual en cada hilo. Ahora bien, si dentro del electrodoméstico hay una fuga y comienza a pasar a tierra a través del cuerpo del usuario (una "pérdida a tierra"), una bobina sensora del interruptor de pérdida a tierra (o GFCI) detecta que la corriente de retorno es menor. Entonces, un microcircuito lógico activa un solenoide cuyo núcleo móvil libera un resorte que al instante abre un conmutador, interrumpiéndose el paso de corriente. Al pulsar el botón test ("prueba") la corriente pasa por una resistencia; crea ésta un desequilibrio que dispara el solenoide. Al pulsar el botón de "reconexión", el resorte vuelve a ser comprimido a su posición de funcionamiento normal.

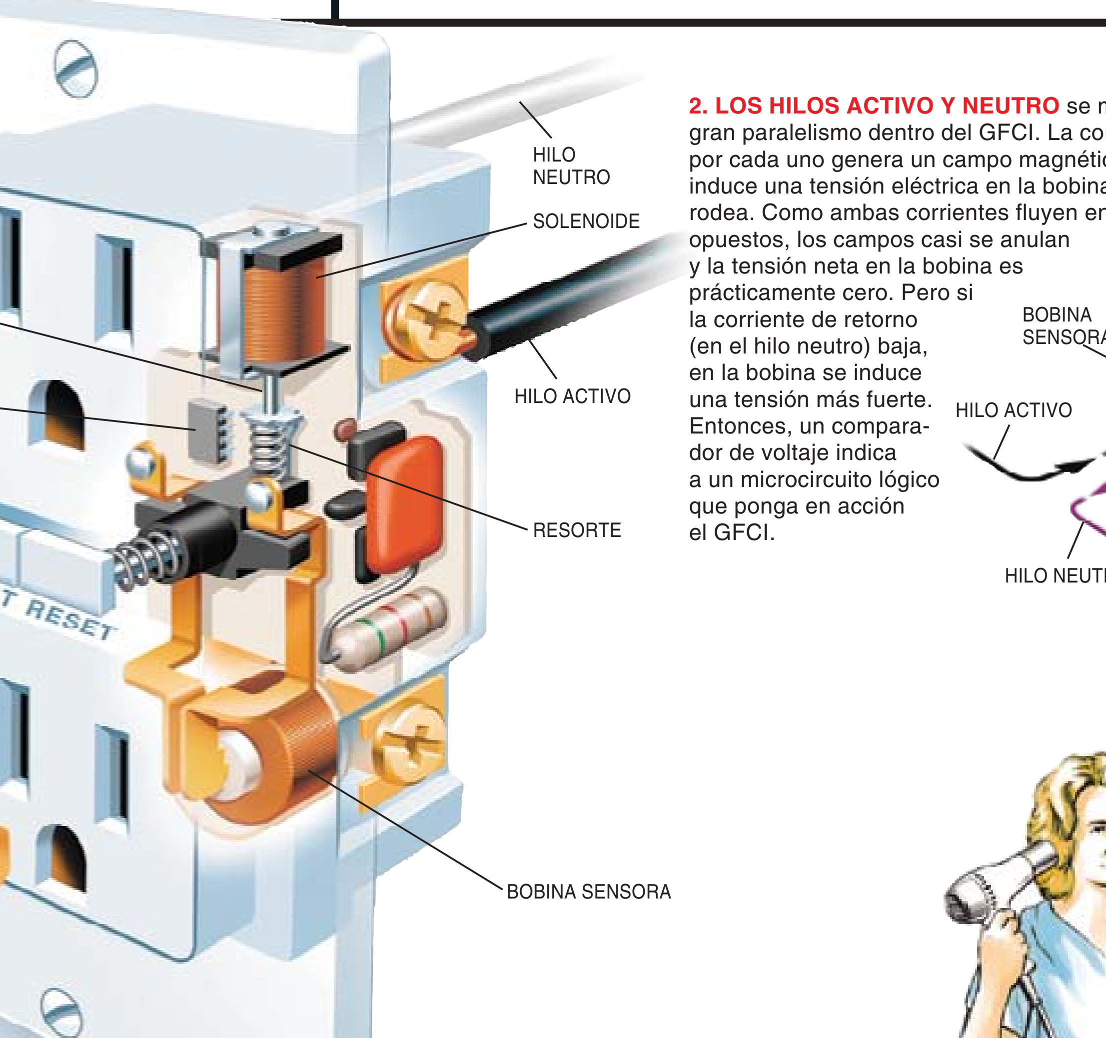
Las ideas para el texto y las ilustraciones se deben a Matt Marone, profesor de física de la Universidad de Mercer, Macon (Georgia).

¿SABIA USTED QUE...?

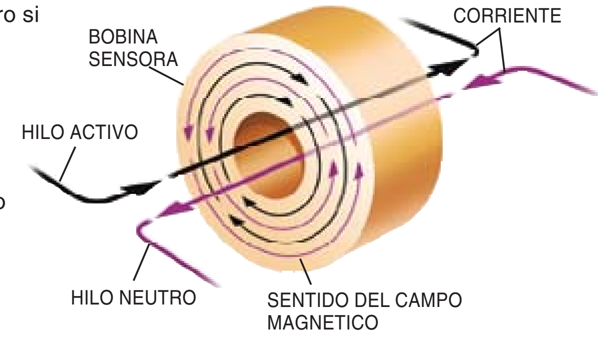
➤ SIN ESCAPE: Una sacudida eléctrica puede convertirse en electrocución cuando una persona que haya tocado la bobina de una tostadora con un cuchillo no puede separarse del utensilio. "Una intensidad de sólo 0,01 puede contraernos los músculos" y mantenerlos así, afirma Matt Marone, de la Universidad de Mercer. Ante esa situación, otra persona deberá abrir el interruptor o el automático de la toma, tirar del enchufe o, en última instancia, empujar al accidentado, sin agarrarse a él, so pena de correr la misma suerte.

➤ LINEA ABAJO: Adecuadamente conectado, un GFCI puede proteger varios enchufes a lo largo de la misma línea. Puede comprobarse oprimiendo el botón test, y enchufando entonces una radio o una lámpara a la toma del GFCI y a otras cercanas para asegurarse de que no hay corriente.

➤ ELECTROCUCIONES: Las causas principales son los cableados domésticos deficientes y productos de consumo defectuosos. Otras causas: tijeras de jardinería que cortan sus propios cables de alimentación, rizadoras o secadoras de cabello que caen en lavabos con agua y taladradoras que dan con un cable al perforar una pared.



2. LOS HILOS ACTIVO Y NEUTRO se montan con un gran paralelismo dentro del GFCI. La corriente que pasa por cada uno genera un campo magnético, que a su vez induce una tensión eléctrica en la bobina sensora que los rodea. Como ambas corrientes fluyen en sentidos opuestos, los campos casi se anulan y la tensión neta en la bobina es prácticamente cero. Pero si la corriente de retorno (en el hilo neutro) baja, en la bobina se induce una tensión más fuerte. Entonces, un comparador de voltaje indica a un microcircuito lógico que ponga en acción el GFCI.





3. UNA SACUDIDA o una electrocución puede ser la consecuencia de tocar un conductor con corriente o sujetar una herramienta o electrodoméstico que esté inadvertidamente electrificado a causa de un falso contacto interno, del agua e incluso una humedad muy intensa.

NEXOS

James Burke

Temas muy intelectuales

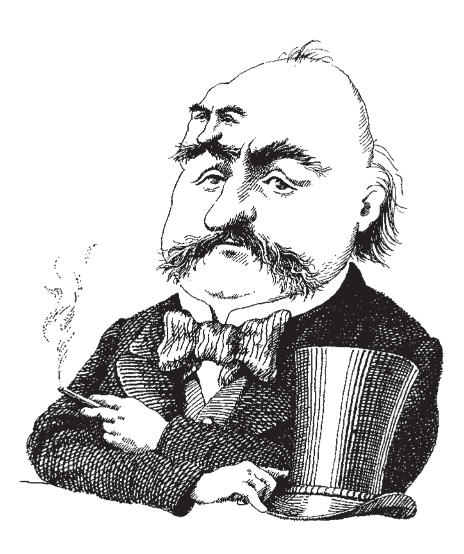
El otro día recibí uno de esos panfletos de propaganda por correo que apremian a suscribirse a un curso a distancia sobre cómo mejorar la memoria. Pensé que si supiera dónde estaba o qué era mi memoria, haría cualquier cosa por mejorarla.

Cierto es que se ha avanzado bastante en tales asuntos neurofisiológicos, en parte gracias al tipo de publicidad que por los años cincuenta del siglo XIX enviaron Isaac Pitman y sus socios en su intento de promocionar una manera totalmente nueva de abordar la fonética inglesa. Sin embargo, sus esfuerzos no obtuvieron ningún resultado. Decidieron entonces vender cursos por correspondencia de una técnica de escritura basada en la fonética, conocida hoy como taquigrafía.

El motivo de Pitman para intentar aproximar el inglés hablado al inglés escrito residía en su palmaria disparidad. No intente el lector pronunciar "Featherstonehaugh" si su lengua materna no es el inglés de Oxford. Ni siquiera aunque lo sea el inglés norteamericano, australiano, neozelandés, canadiense o sudafricano. ¿Desiste? Es "Fanshaw". Pitman creía que la paz mundial se conseguiría antes, porque al simplificar palabras tales como "Featherstonehaugh", haciéndolas más fáciles de leer y pronunciar, resultaría más sencillo someter a todos esos extranjeros a la influencia civilizadora del inglés oxoniense.

La idea echó raíces, pero a escala mucho mayor de lo que la mente ingenua de Pitman podía haber esperado. En 1897 apareció el Alfabeto Fonético Internacional, que facilitó la pronunciación y transliteración de todas las lenguas.

Un primer espada en fonética fue Henry Sweet, en quien se inspiraría George Bernard Shaw para dar vida al profesor Higgins en



Pygmalion. En la obra, Higgins transcribe la forma de hablar del personaje de Elisa; utiliza "habla visible", una serie de caracteres que había desarrollado mucho antes el padre de Alexander Graham Bell, profesor de declamación y miembro fundador del Consejo Británico de Fonética. Hacia el decenio de 1870 Bell hijo andaba ocupado representando sonidos para los alumnos sordos a los que impartía lecciones en Boston.

En esa tarea batallaba cuando desarrolló el fonoautógrafo, aprovechando un prototipo inventado por alguien que cayó en el más completo de los olvidos, E. Leon Scott de Martinville. El aparato era en sus inicios bastante primitivo: los sonidos hacían vibrar una membrana mientras un pincel situado al otro lado de la misma trazaba figuras sobre un vidrio ahumado móvil. Con este aparato Bell pudo enseñar a sus alumnos cuál era la forma correcta del sonido que intentaban reproducir, de forma que lo pudieran comparar con sus propios esfuerzos miméticos.

La idea probablemente la inspiró un artefacto desarrollado años antes por Etienne J. Marey, un fisiólogo francés que colocó una fina membrana en un tambor y puso el aparato allá donde deseaba para transformar ritmos vitales en gráficos. Cuando una presión abombaba la membrana, el aire del tambor se canalizaba por un tubo para golpear otra membrana ajustada a otro tambor situado en el extremo opuesto del tubo. Montado en esta segunda membrana había un puntero que se movía en consecuencia y trazaba una línea. Con el tambor, vigente en medicina hasta 1955, Marey podía reducir cualquier vibración fisiológica a una tira gráfica. Le gustaba llamar pomposamente a sus garabatos "el lenguaje de la vida".

Que la innovación viniera de Francia no deja de ser natural, habida cuenta de que, a principio del siglo XIX, los hospitales parisienses eran los más avanzados del mundo. Hasta los ingleses acudían a tomar notas. Lo nunca visto.

Los pases de visita, las gráficas, el diagnóstico estetoscópico y la estadística médica encontraron allí por primera vez una aceptación generalizada. Y con todo ello, la incuestionable autoridad de los médicos, que debemos en parte a Napoleón y a su idea de ganar las batallas basándose en los números. Los soldados del ejército francés se contaban con cifras de seis ceros, después de ser el primero en establecer el reclutamiento en todo el país. Inevitablemente miles de jóvenes soldados marchaban del campo de batalla al hospital, siempre disciplinados y obedientes.

Los números tuvieron también su importancia en técnica médica. Porque ahora los galenos disponían de tantos heridos de guerra que el hospital ya podía recoger cantidades ingentes de datos estadísticos que permitieran establecer la eficacia de la evaluación y el trata-

miento del paciente. Así empezaron a aparecer al pie de la cama esas caprichosas líneas que describen la respiración del paciente, su temperatura y frecuencia cardíaca y cualquier otra determinación física que pueda reducirse a líneas y números.

A finales del siglo XIX, todo ello allanó el camino para la introducción en el desconocido campo de los trastornos psicológicos y su tratamiento de una novísima técnica de origen vienés llamada mesmerismo. Los ayudantes de Franz A. Mesmer iniciaban el examen del enfermo con la identificación de sus "polos magnéticos", para que luego hiciera aparición el propio Mesmer, tocado con sombrero de plumas y una larga túnica. Mediante una precisa percusión en determinadas zonas del cuerpo del paciente pretendía transmitir una misteriosa "influencia" curativa.

A pesar de que algunos prohombres de la ciencia, así Benjamin Franklin, tildaran de falsario a Mesmer, su influencia persistió. La idea, al fin y al cabo, tenía más de trescientos años de vida. El mismo Descartes postulaba que un espíritu vital emanaba de la glándula pineal y alcanzaba los nervios. Por esta razón, hacia 1820 otros dos buhoneros, Franz J. Gall y Johannes C. Spurzheim, abrieron la nueva "ciencia" de la frenología. Se basaba en la noción de que un líquido influyente se originaba en 37 órganos del cerebro distintos, cada uno de ellos responsable de una determinada característica moral, sexual o intelectual. De esta forma era posible conocer el carácter de una persona a partir de las prominencias óseas del cráneo que las cubría. A modo de ejemplo, un cierto chichón ubicado detrás de la oreja izquierda señalaba a un buen amante.

En 1876 Cesare Lombroso, director de un asilo de enfermos mentales, estudió miles de cabezas (de vivos y cadáveres) y llegó a la conclusión de que la teoría de la evolución de Darwin, según la cual el hombre descendía del mono, era acertada. Fue Lombroso quien sugirió que los locos y los criminales, con una frente menos recta de lo que cabría esperar, suponían un retroceso en la escala evolutiva. La palabra Neanderthal pasó a estar de moda, tras el reciente descubrimiento alemán de huesos antiguos en el valle Neander.

Algunos conservadores interpretaron las teorías de Lombroso sobre las características criminales como indicadoras de que la criminalidad era congénita, de forma que la única duda se planteaba entre una condena a cadena perpetua o la simple ejecución del individuo. Los liberales vieron en la identificación de las prominencias la posibilidad de la rehabilitación y de la reforma de las prisiones. La asistencia social se encontró de esta manera con una nueva herramienta para la investigación y la autorreforma.

Tal vez el resultado más asombroso del trabajo de Lombroso fue el efecto que tuvo sobre un joven que le sirvió de ayudante en 1872. Como parte de su trabajo, realizó numerosas necropsias. Intrigado por el debate sobre las prominencias relacionadas con el conocimiento, empezó a realizar finos cortes de cerebro en su cocina y a estudiarlos con el microscopio de un tío de su mujer, que resultó ser anatomopatólogo.

En 1873, tal vez estimulado por la nueva química de la fotografía, colocó una muestra de cerebro en un baño de bicromato potásico y cloruro de osmio; la sumergió luego en una solución de nitrato de plata. Cortó secciones muy finas del material, las dejó secar y las transiluminó. Así vio algo que cambió lo que pensamos sobre cómo pensamos. Lo que Camillo Golgi identificó sobre un fondo de tejido de color dorado, en cuyo seno se hacían visibles, fueron las células del cerebro que hoy llevan su nombre, en un nítido y preciso color negro gracias a la tinción. A partir de ese experimento singular iniciará su andadura la ciencia de la neurofisiología.

Si alguien, alguna vez, descubre dónde reside la memoria y cómo mejorarla, el lector se lo deberá agradecer a Golgi y los fanáticos de la frenología. Y a ese mensaje de correo de propaganda que mencioné al principio (¿se acuerda?).

Evolución

Trasfondo y resonancia

NAISSANCE ET DÉVELOPPEMENT DU VITALISME EN FRANCE DE LA DEUXIÈME MOITIÉ DU 18E SIÈCLE À LA FIN DU PREMIER EMPIRE, por Roselyne Rey. Voltaire Foundation; Oxford, 2000.

DIE ENTDECKUNG DER EVOLUTION. EINE REVOLUTIÖNARE THEORIE UND IHRE GESCHICHTE, por Thomas Junker y Uwe Hossfeld. Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Darmstadt, 2001. **LE DÉVELOPPEMENT DE LA PALÉONTOLOGIE CONTEMPORAINE,** por Cédric Grimoult. Librairie Droz; Ginebra, 2000.

DARWIN'S MENTOR JOHN STEVENS HENSLOW, 1796-1861, por S. M. Walters y E. A. Stow. Cambridge University Press; Cambridge, 2001. **THE CORRESPONDENCE OF CHARLES DARWIN. Volumen 12. 1864.** Edición preparada por Frederick Burkhardt *et alii*. Cambridge University Press; Cambridge, 2001.

THE UNFIT. THE HISTORY OF A BAD IDEA, por Elof Axel Carlson. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2001. **DARWINISM IN PHILOSOPHY, SOCIAL SCIENCE AND PUBLIC POLICY,** por Alex Rosenberg. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **MORPHOLOGISCHE METHODEN IN DER EVOLUTIONFORSCHUNG,** por Christine Hertler. Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2001.

Si en biología, parafraseando a Theodosius Dobzhansky, nada tiene sentido a menos que se le considere desde una óptica evolucionista, deberemos preguntarnos qué es lo que evoluciona. Lo vivo, ciertamente. Pero, ¿a qué llamamos vida? Al conjunto de funciones que se resiste a morir, responderá Marie-François-Xavier Bichat en el alba del siglo XIX. La doctrina que, desde media centuria antes, postulaba que tales funciones no se reducían a procesos físicos y químicos recibió el nombre de vitalismo (*Naissance et Développement du Vitalisme en France*), un movimiento originado en la facultad de medicina de Montpellier que tuvo en la *Encyclopédie* una privilegiada caja de resonancia.

No debemos asociar las raíces del vitalismo con el dualismo cartesiano, defensor tenaz del mecanicismo. Sí cabe enlazarlo con la teoría del arqueo (forma sutil y volátil que alentaba al organismo) de su coetáneo J. B. van Helmont y con todos los que admitían un principio organizador interno, una fuerza vital.

El vitalismo ilustrado surge de la frustración de la iatroquímica y de la iatrofísica. Los modelos de la física y la química se reputan impropios por naturaleza para dar cuenta del organismo, sistema que no se forma como las máquinas creadas por el hombre, sino que se desarrolla a través de una epigénesis admitida. Varias obras convergen, en el ecuador del siglo XVIII, en la fundamentación de sus tesis, en particular, el *Traité des systèmes* de Condillac, que recoge la doble herencia de Locke y de Newton, el *Specimen novi medicinae conspectus* de Le Caze y la exposición doctoral de Bordeu *De sensu generice considerato*.

Dos son, en esa tendencia, las propiedades distintivas de los organismos; a saber, la irritabilidad y la sensibilidad, reducida aquélla en última instancia a ésta. La remisión de la *Encyclopédie* resulta elocuente: "Irritabilidad, véase Sensibilidad". En la obra de Diderot y d'Alembert hallamos compendiada la gavilla de intereses de los vitalistas, que podemos sintetizar en las contribuciones de Jean-Jacques Ménuret de Chambaud sobre "economía animal", "inflamación", "espasmo", "pulso" y un largo etcétera, con la aportación de Bordeu sobre la "crisis".

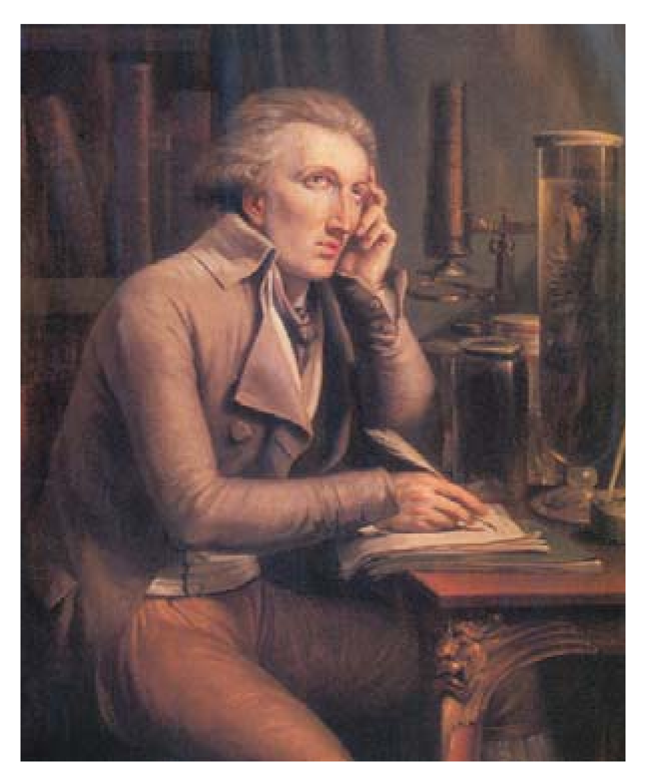
Al vitalista, neohipocrático, le importa el individuo en su totalidad. Lo comprobamos en su epígono máximo del final de esa centuria y comienzos del siglo XIX, Bichat. Formado con Marc-Antoine Petit, sostuvo que la patología debía basarse en la estructura de los tejidos, con independencia de su localización en los órganos. Los tejidos difieren entre sí por la composición de sus propiedades vitales y disposición de sus fibras. Las propiedades del tejido dependen de la organización (extensibilidad y contractilidad), en tanto que las propiedades vitales dependen de la vida. Como indica en el prefacio de sus *Recherches sur la vie et la mort*, se propuso unir el método experimental (recurrió a la vivisección) con las perspectivas filosóficas de largo alcance. En su *Anatomie générale* busca la síntesis de los conocimientos anatómicos, fisiológicos y patológicos de la época, incluidos los químicos.

El vitalismo no muere con Bichat en 1802. Al evocar en Lavoisier y Bichat las dos grandes tendencias filosóficas que se oponen desde el origen de la ciencia, reduccionista una y autonomista la otra, escribía Claude Bernard: "esta lucha tan vieja no ha terminado todavía. ¿Cómo debería terminar? ¿Triunfará una sobre la otra? No lo creo."

En una perspectiva muy distinta se sitúa, sin embargo, Jean-Baptiste de Lamarck (*Die Entdeckung der Evolution* y *Le Développement de la Paléontologie Contemporaine*). Negaba éste la existencia de fuerzas vitales internas, pero defendía la transformación del organismo a instancia de fuerzas externas. El medio modifica la herencia. Lamarck se había forjado un sólido bagaje botánico, que completó, llegada la Revolución, con su dedicación al mundo invertebrado. Dominaba la variabilidad e historia fósil de los moluscos. Gracias a sus apuntes manuscritos se ha reconstruido la evolución de su pensamiento. Si en enero de 1799 enseñaba el carácter constante de las especies, año y medio más tarde proponía la transformación de las mismas,

que ejemplificaba en el cotejo de moluscos fósiles y representantes actuales.

Subrayó la apariencia distinta que manifestaban las plantas si las semillas se sembraban en entornos diferentes. Advirtió también que las plantas cultivadas a partir de semillas silvestres producían especímenes con algunos rasgos peculiares. A estas variaciones las llamó degradaciones. Introdujo la teoría de la trayectoria u orden seguido por la naturaleza, lo que más tarde se denominará evolución. En su opinión, la forma más elemental de vida surgía por generación espontánea. Por complejidad en su relación con el medio, se habían ido constituyendo dos líneas principales, una que arrancaba de los infusorios y otra que partía de los vermes.



Georges Cuvier (1769-1832)

Lamarck no apela a ningún episodio de extinción. Lo contrario del paladín del fijismo, Georges Cuvier, quien presenta numerosas pruebas en su favor en su exposición de la teoría de las catástrofes, tesis ésta que no habría de resistir los descubrimientos acumulados por la paleontología estratigráfica. En el primer tercio del siglo XIX, los naturalistas multiplican el número de revoluciones del globo para explicar la desaparición periódica de los organismos. Cuvier postula tres, en las fronteras de las grandes eras geológicas. Sus seguidores Elie de Beaumont y Alcide d'Orbigny indican más de una veintena.

Las ideas transformistas de Lamarck cobran en Francia un particular impulso con Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, antagonista de Cuvier. Gran Bretaña no se muestra receptiva a las teorías lamarckistas, aunque de ellas se hace eco Charles Lyell en el segundo volumen de sus *Principles of Geology*. En Alemania el pensamiento biológico inmediato a Imamnuel Kant (partidario de la inmutabilidad de las especies, aunque con cierta plasticidad de las mismas en línea con Aristóteles y los medievales) gira en torno a la *Naturphilosophie* de Friedrich Schelling y Lorenz Oken, quienes rechazan las tendencias reduccionistas y mecanicistas.

Entre los años treinta y cincuenta del XIX se producen una serie de avances espectaculares en fisiología, citología y embriología, que prepararán el camino a la recepción de la teoría darwinista. Otras influencias determinantes son más domésticas (*Darwin's Mentor John Stevens Henslow* y *The Correspondence of Charles Darwin*). El haber dado con Henslow, comentaba Darwin, constituyó la circunstancia de mayor peso en su carrera. Discípulo, primero, le introdujo en la historia natural y le guió estando incluso embarcado en el Beagle.

Henslow, el mayor de una familia mesocrática de 11 hijos, recibió a los catorce años un premio que despertó su entusiasmo por la exploración naturalista, *Viajes de Africa*, de Levaillant. Estudió química con Cumming, mineralogía con Clarke y geología con Sedgwick. Este le invitó a una excursión de campo a la isla de Wight, para conocer *in situ* los estratos rocosos, origen, con otro viaje que realizó solo a la isla de Man, de *The Geological Drescription of Anglesea*.

Lo mismo que Sedgwick, Henslow supo entender el sentido simbólico del *Génesis* en su descripción del tiempo geológico de la creación. Hombre de mente abierta, aunque alejado de las especulaciones de Lyell, le recomendó a Darwin la lectura de sus *Principles*. En 1822 Henslow sucedió a Clarke en la cátedra de mineralogía, a la que renunció años más tarde por la de botánica. Su primera aportación escrita en este dominio es el programa o *Syllabus* del curso. En la lista de libros allí recomendados encontramos cuatro manuales, dos de Auguste de Candolle y otros dos de James Edward Smith. No se despegaría nunca de la sombra del gran botánico suizo. En 1835 publicó unos *Principles of Descriptive and Physiological Botany*, divididos en una parte "descriptiva" y otra "fisiológica". Aunque no se muestra particularmente innovador, sí relaciona forma y función, que tanto influiría en Darwin. Aplica métodos cuantitativos, como en el caso de la disposición espiral de las escamas de los conos de *Picea excelsa*.

Henslow recibe del impresor uno de los primeros ejemplares del *Origen de las especies*, acompañado de una carta de su autor. Tras leerlo, visita a Darwin en febrero de 1860. "Aunque siempre he expresado mi mayor respeto por las opiniones de mi amigo, confiesa, le he dicho que no puedo aceptar sus especulaciones sin ver pruebas más sólidas de las que ha aportado". Muchos pensarán como él y lo harán público. Uno de los más sólidos, Louis Agassiz. A éste le escribía Darwin el 12 abril de 1864: "Muy señor mío: Por culpa de una prolongada enfermedad y ausencia de Londres, he recibido hace sólo escasos días un ejemplar de su *Métodos de estudio* con algunas otras publicaciones, así como su amable nota de presentación a Mr. Lesly. Le agradezco vivamente el regalo. Sé con qué energía se opone usted a casi todo

Antropología de campo

FRANZ BOAS AMONG THE INUIT OF BAFFIN ISLAND, 1883-1884. Introducción y coordinación de Ludger Müller-Wille. Traducción de William Barr. University of Toronto Press; Toronto, 1998.

Franz Boas, nacido en Minden, Alemania, el 9 de julio de 1858, y fallecido en Nueva York el 21 de diciembre de 1942, está considerado como el fundador de la moderna antropología de campo y académica de los EE.UU. Formado en la universidad alemana, y doctorado en física en Kiel (1881), muy pronto manifestó su interés por la geografía ártica y comenzó a recopilar información sobre los esquimales y sus formas de vida. Dos años después de obtener el título académico, consiguió los medios que le permitieron dirigirse a la Isla de Baffin, y aquí entre 1883-1884, realizó su trabajo de campo entre los inuit, esquimales de la región. Tenía entonces 24 años.

La importancia histórica de este libro consiste en el hecho de que nos ofrece los diarios, notas y cartas de campo escritas por Boas durante el tiempo de su permanencia entre los inuit. Incluyen, por lo tanto, sus reflexiones e intereses conforme iba desarrollando su estudio sobre la vida cotidiana de los indígenas de Baffin. Estos materiales conducen, en todo caso, a entender las experiencias ambientales de Boas con los inuit, y lo que es más importante: nos permite penetrar en los entresijos del modo de construir una monografía etnográfica de campo. En realidad, viene a ser la historia del cómo se comienza y del cómo se concluye un trabajo de campo en determinadas condiciones de clima, de recursos y de una inicial extrañeza cultural del antropólogo en relación con los modos de vivir los indígenas.

Este libro incluye, además, el "Diario" de Wilhelm Weike, que fuera criado de la familia de Boas y que éste incorporó a la expedición. Se trata, pues, de dos perspectivas diferentes, la del científico Boas, y la del sencillo Weike, dos modos de percibir lo mismo cuando las relaciones sociales de ambos con los inuit eran, de hecho, distintas.

Al respecto de los intereses iniciales de Boas, cabe significar influencias muy definidas en sus estudios como las que recibió directamente de Theobald Fischer, geógrafo, Friedrich Ratzel, geógrafo y etnógrafo alemán, de Adolf Bastian, etnólogo, y de Rudolf Virchow, antropólogo, aparte de Ernst Haeckel, zoólogo de gran predicamento científico en aquel tiempo y creador del concepto de ecología. Estas influencias estuvieron presentes en su enfoque de

cuanto escribo, pero me satisface profundamente que no ponga en ello ninguna animosidad personal, lo que sí ha ocurrido con antiguos amigos míos ingleses. Con mi más cordial agradecimiento y respeto sincero."

Ese año de 1864 fue un año productivo para Darwin. Su epistolario revela el profundo impacto de su teoría sobre el origen de las especies. En mayo envió su artículo "Tres formas de *Lythrum salicaria*" a la Sociedad Linneana de Londres, donde aportaba pruebas que respaldaban su idea de que el dimorfismo y el trimorfismo floral constituían adaptaciones para asegurar la polinización cruzada. Avanzado el verano, había acabado el primer borrador de "Sobre los movimientos y hábitos de las plantas trepadoras". Retomó de nuevo el manuscrito que iba a convertirse en *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*, que afianzaba la tesis expuesta en *Origin*. Sus seguidores le enviaban noticias reconfortantes. Ernst Haeckel, desde Alemania, le remitió su lección pública sobre la teoría de la selección natural y le informaba del progreso de la teoría en los círculos alemanes y suizos. Pero también supo de las reseñas negativas de Marie-Jean-Pierre Fleurens, secretario de la Academia Francesa de Ciencias, y de Rudolf Albert von Kolliker, un reputado fisiólogo suizo. Francia fue, en efecto, uno de los países más refractarios al darwinismo. Tampoco Italia mostró en un comienzo excesivo fervor. En España el médico valenciano Peregrín Casanova fue, con mucho, su más apasionado propagador, vía Haeckel.

Las tesis darwinistas trajeron un cambio radical en los planteamientos básicos de las ciencias naturales, de la paleontología a la ecología, pasando por la morfología y sistemática, citología y fisiología. A finales de los años sesenta, incorporaban las ideas darwinistas el *Manual de botánica* de Julius Sachs, la *Morfología general de las plantas* de Wilhelm Hofmeister y la segunda edición de los *Fundamentos de anatomía comparada* de Gegenbaur. De la paleontología, se presumía, vendría su apoyo principal, esperanza que se hizo realidad en la evolución de los équidos estudiada por Wladimir O. Kowalesky.

Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844)

Al amparo del darwinismo se acogieron tendencias sociales y políticas aniquiladoras que venían de tiempo atrás (*The Unfit*) y proclamaban, cuando menos, la segregación de enfermos mentales, mendigos y otros "degenerados". Una línea de pensamiento que no se extinguió con la derrota nazi, sino que ha reverdecido en sutiles metamorfosis de carácter identitario y excluyente. Ayer y hoy la justificación última residía en la herencia.

Salvo alguna matización (la asociación de un mal físico a una transgresión moral, propia de la tradición veterotestamentaria, fue rechazada de plano en el Nuevo Testamento), pocos podrían haber redactado un libro tan sólido sin la capacitación profesional de Elof Axel Carlson, genético e historiador de su disciplina. Busca éste los precedentes inmediatos en Herbert

campo, y todas ellas se convirtieron muy pronto en una pluralidad epistemológica que Boas reunió en una particularidad científica, la de antropología, específicamente la del Artico.

En el comienzo de su estudio de campo, predominó en Boas la influencia geográfica, y a ésta dedicó su atención más cuidadosa. Se trataba, primero, de establecer hasta qué punto existía una relación dinámica entre el espacio ártico con sus hielos y estaciones climáticas, con sus animales, marinos y terrestres, percibidos como recursos vitales de los grupos inuit, y las migraciones estacionales que emprendían estos indígenas en función, incluso, del grosor de los hielos que daban cuenta de la presencia o ausencia de las focas, tanto como podían indicarlo, además, las temperaturas de cada temporada. Boas significó la relación entre las formas de organización social de los indígenas y el condicionamiento de éstas en función de la naturaleza ambiental en la que vivían. En el inicio, pues, para Boas esta relación de lo ecológico con la forma de vida constituía la clave explicativa de las estrategias estacionales de los inuit, y de la influencia de éstas en sus instituciones operativas, los vocabularios, las temáticas, el folklore, la ideología, la estética y la ética. El punto de referencia era naturalista, y en este sentido la documentación que nos transmiten los diarios, las notas y las cartas nos indican la prevalencia de un tratamiento holístico de los problemas de campo a partir, especialmente, del estudio de una primera realidad que tendría el carácter de un primer determinismo ecológico.

Las aportaciones de esta clase de documentación nos permiten observar el proceso de transformación progresiva de los intereses de Boas, pues a medida que definía la dinámica de la organización social en términos del modo ambiental que la condicionaba, al mismo tiempo aprendía la lengua de los inuit, vivía con éstos su sociedad cotidiana, y comía sus alimentos en forma de una relación comunitaria. Así, mientras vivía el mundo económico, la técnica aplicada, el mundo material, en suma, se adentraba en el conocimiento del folklore y de las ideas del grupo indígena, todo lo cual acabaría definiéndose por Boas como antropología cultural, una donde el accidente geográfico, el hielo y el clima, se convertían en variables del modo de construir una forma cultural. La monografía clásica de Boas, *The Central Eskimo*, sería un referente de cómo son los deberes de un empirista en su intento de percibir y construir la realidad del otro. Los diarios serían el diseño mental de la experiencia de campo.

—Claudi Esteva Fabregat

Spencer, quien acuñó la expresión "supervivencia del más adaptado" seis años antes de que Darwin publicara su teoría del origen de las especies por selección natural. El credo racial lo enuncia en 1853 Joseph Arthur en su *Desigualdad de las razas humanas*, que sitúa en la cúspide a los arios. No se quedará atrás Benedict Augustin Morel en el *Traité des dégénerescences physiques, intellectuelles, et morales de l'espèce humaine, et des causes qui produissent ces vérités maladives* (1857); sostiene que la degeneración causada por entornos desfavorables conduce a una degradación de la herencia.

Desde 1859, cuando aparece la tesis de la selección, y sobre todo, tras su aplicación en 1871 al hombre por el propio Darwin en *Descent of man*, al poco de *Hereditary genius*, de Francis Galton, se conforman dos corrientes eugenésicas, denominadas negativa y positiva, según el énfasis puesto en las medidas "correctoras". Defienden lisa y llanamente la reclusión y esterilización de pícaros, dementes y criminales, los eugenistas norteamericanos, escandinavos y alemanes sobre todo. Galton y otros proponían una mejora a través de la higiene social. Mucho se adelantó con las medidas de extensión de la sanidad y la higiene, aunque en muchos casos esa voluntad venía lastrada de prejuicios, del propio Galton incluso, cuando animaba a incorporar la tradición alemana del matrimonio de profesores con hijas de otros profesores.



John Stevens Henslow, 1796-1861

El darwinismo tornaría a sus límites, mucho más afianzados, en el segundo cuarto del siglo, con la teoría sintética de la evolución, que mancomunaba la genética con la paleontología y la sistemática. Auspiciaron su nacimiento y conformación una serie de trabajos decisivos: *Genética y origen de las especies* (1937), de Theodosius Dobzhansky, *La nueva sistemática* (1940), coordinada por Julian Huxley, *Sistemática y origen de las especies* (1942), de Ernst Mayr, *Tempo y modo en evolución* (1944), de George Gaylord Simpson, y *Variación y evolución de las plantas* (1950), de G. Ledyard Stebbins.

Con el tiempo, el neodarwinismo dio pie a una nueva visión de la filosofía de la vida (*Darwinism in Philosophy, Social Science and Public Policy*). Debe ésta fundarse, por definición, en el conocimiento científico de las entidades y procesos vivos. Los propios investigadores comienzan a hablar de la ontología del gen como herramienta unificadora de

Biodiversidad

DIVERSITÉ BIOLOGIQUE. LES PERSPECTIVES DU SIÈCLE NAISSANT, por Gregor Klaus, Jörg Schmill, Bernhard Schmid y Peter J. Edwards. Birkhäuser; Basilea, 2001.

Dice Edward Wilson que el mayor milagro de nuestro planeta es la increíble variedad de sus formas de vida. Impulsada por el motor de la evolución, la vida tiende a la diversificación extrema, y ello ha conducido a una espectacular atomización de especies. Pero la biodiversidad está en crisis debido al prodigioso incremento del ritmo de extinción de especies. ¿Qué se pierde con la caída de biodiversidad? ¿Cuántas especies pueden desaparecer sin que se produzcan trastornos graves en los ecosistemas? ¿Cuál es el tamaño mínimo que debe tener una reserva para que se puedan mantener todas las especies que queremos preservar en ella?

La respuesta a ese tipo de preguntas es el primer paso para hallar soluciones a los problemas reales que vayan surgiendo. *Diversité biologique* es un ejemplo de cómo se puede caminar en este sentido, aplicado al caso de Suiza, un país desarrollado y con un patrimonio biológico seriamente amenazado. El libro recoge los resultados de un proyecto de investigación de ocho años de duración, en el que han participado una cincuentena de científicos. Su rigurosa presentación le convierte en un valioso manual de diagnóstico y terapia de problemas de la biodiversidad.

Las primeras páginas describen el patrimonio biológico del país y las amenazas que se ciernen sobre el mismo. Se destaca la profunda influencia de una ordenación territorial en mosaico, con un porcentaje muy alto de la superficie ocupado por cultivos, pero en el que destacan ecosistemas especialmente biodiversos, como los pastizales pobres. El tercio del libro que sigue se dedica a diagnosticar los problemas, desde la industrialización del paisaje hasta el cambio climático. Se resaltan los obstáculos que representan la creciente urbanización, la agricultura extensiva, la expansión de la red de carreteras, etc. Pero, también se describen las experiencias de fragmentación realizadas en los pastizales pobres, que ilustran las relaciones entre área y número de especies, de interés en la ordenación del territorio y la preservación de la biodiversidad.

La parte dedicada a estrategias ocupa la mitad final del libro y nos habla de respuestas a los problemas. Se revisan las leyes que tienen incidencia en conservación. Se exponen sugerencias prácticas para optimizar la preservación de la biodiversidad en un territorio muy fragmentado, basadas en ampliar las zonas protegidas y conectarlas entre sí. En todo el asunto, un aspecto clave es contar con la complicidad de los agricultores, responsables de la gestión de una gran parte del territorio. Y aquí las propuestas no se limitan a discursos teóricos, sino que tratan de implicar al agricultor en la solución de problemas, ofreciéndole propuestas (mantenimiento de barbechos florales, de zonas de compensación, de corredores, etc.) que, aparte de estar correctamente financiadas, resulten convincentes para su particular idiosincrasia. Finalmente, se propone el desarrollo de un sistema de seguimiento sistemático que permita observar a la vez las modificaciones ambientales y las acciones de las autoridades responsables.

—XAVIER BELLÉS

la biología. La secuenciación genómica de una levadura, un nemátodo, una mosca, una planta y el hombre ha puesto de manifiesto que los eucariotas comparten genes que determinan funciones biológicas clave. Lo que el filósofo llamaría regularidad y universalidad del objeto a estudiar.

Algunos, Rosenberg entre ellos, proponen que sea la ciencia la que oriente la epistemología y la metafísica. Esa tendencia naturalista, así se la llama, cuenta entre sus pilares últimos el principio de la selección. Pero si toda epistemología debe ser normativa, resulta harto difícil justificar esa propiedad en el marco naturalista. Si algo caracteriza a los seres vivos, y los distingue de los inertes, es la excepción, la variabilidad, el influjo de las condiciones externas, etcétera. Lo que no significa que el avance de la biología molecular, de la termodinámica de los procesos irreversibles, de la teoría de juegos y de otros constructos estadísticos no confieran creciente rigor sistemático a las ciencias de la vida y permitan aproximaciones más o menos generales, vale decir, predictivas.

El neodarwinismo ha incidido también en el desarrollo de las teorías morfológicas (*Morphologische Methoden in der Evolutionforschung*). Puntal la morfología, a su vez, del asentamiento de las tesis evolutivas, Darwin la consideraba el alma de la historia natural. Se nos ofrecen hoy varios enfoques sobre la representación del plano corporal y su reconstrucción en el curso de la historia. Hasta diez recoge Christine Hertler en su monografía de grado, elaborados atendiendo a su génesis. Ni que decir tiene que, por tratarse de un mismo asunto, los métodos se solapan, imbrican y complementan a menudo.

En la morfología filogenética y sistemática filogenética el criterio fundamental se halla en los caracteres. Así operan cladismo y taxonomía numérica, por ejemplo. En el bien entendido de que los caracteres no se ciñen a los individuos y especies, sino a clases y grupos filogenéticos, como puede ser la sistemática de los mamíferos. Se trata de un método que hace especial hincapié en las semejanzas, esto es, en las homologías y apomorfías.

Por su parte, la morfología funcional recrea los sistemas de estructura-función; pensemos, por ejemplo, en la evolución de la homotermia y la construcción de los pulmones. Otros métodos parten de la paleontología, donde descubren largos períodos de estasis salteados por instantes de especiación rápida, otros de la biología del desarrollo (conservación de secuencias de ADN) y otros la anatomía comparada (contrastes entre agnatos y gnatostomos).

—LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



VASOS DE VIDA Y DE MUERTE, por Rakesh K. Jain y Peter F. Carmeliet
Cuando sea posible regular la formación de vasos sanguíneos nuevos, angiogénesis, se contará con un nuevo tipo de tratamiento del cáncer o de las enfermedades del corazón. Los ensayos en seres humanos con la primera generación de fármacos desarrollados con este objetivo se encuentran en la última fase de experimentación.

ALIMENTACION EN HARAPPA, por Dietrich Sahrhage
Los arqueólogos saben todavía poco sobre la antigua cultura del valle del Indo. Sin embargo, las representaciones pictóricas, los hallazgos óseos y los restos de redes de pesca hablan a favor de que el pescado era la principal fuente de alimentación.

INDIA, PAQUISTAN Y LA BOMBA, por M. V. Ramana y A. H. Nayyar
Cuando EE.UU. movilizaba sus fuerzas armadas en los días que siguieron a los ataques terroristas del 11 de septiembre, la atención mundial convergía en Paquistán, país crucial para las operaciones militares en Afganistán.

LA BIOLOGIA EN EL ULTIMO CUARTO DE SIGLO, por José María Valderas
La aparición de nuevas técnicas —pinzamiento de membrana, secuenciación automática y procesos avanzados de formación de imágenes—, sumada al creciente conocimiento molecular de los materiales biológicos han acelerado el desarrollo de las ciencias de la vida en los últimos 25 años.

FITOCROMOS Y DESARROLLO VEGETAL, por Jaime F. Martínez García, Elena Monte y Francisco J. Ruiz Cantón
Los fitocromos son unos pigmentos vegetales que controlan diferentes aspectos del desarrollo e informan a las plantas de los cambios operados en el entorno para optimizar su crecimiento.

CRISTALES FOTONICOS: SEMICONDUCTORES DE LUZ, por Eli Yablonovitch
Materiales nanoestructurados con formaciones ordenadas de agujeros podrían conducir a una revolución optoelectrónica, haciendo con luz lo que los semiconductores realizan con electrones.

LAS PRIMERAS ESTRELLAS DEL UNIVERSO, por Richard B. Larson y Volker Bromm
Con una masa y un brillo excepcionales, las estrellas primigenias cambiaron el curso de la historia cósmica.

LOS ORIGENES DE LA INFORMATICA PERSONAL, por M. Mitchell Waldrop
Ni Gates, ni Jobs, ni Wozniak. Los cimientos de los modernos ordenadores interactivos fueron echados decenios antes.

